



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

MĚŘENÍ VĚTROVÝCH OSCILAČNÍCH VLN NA NÁDRŽI

MEASUREMENT OF WIND OSCILATORY WAVES ON RESERVOIR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. STANISLAV KOTAŠKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MIROSLAV ŠPANO, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Stanislav Kotaška
Název	Měření větrových oscilačních vln na nádrži
Vedoucí práce	Ing. Miroslav Špano, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Ing. Miroslav Špano, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

PODKLADY A LITERATURA

Čábelka, J.; Novák, P. Hydrotechnický výzkum I, modelový výzkum SNTL, Praha, 1964

Pullen, T.; Allsop, N. W. H.; Bruce, T.; Kortenhaus, A.; Schüttrumpf, H. & der Meer, J. W. EurOtop, European Overtopping Manual-Wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual Environment Agency, ENW, KFKI, 2007

Spanilá, T.; Jahoda, K. K charakteristikám větrových vln a zkušenostienosti s vyhodnocením záznamu vlnoměru Journal of Hydrology and Hydromechanics, Institute of Hydrology of the Slovak Academy of Sciences and the Institute of Hydrodynamics of the Academy of Sciences of the Czech Republic, 2004, 52, 115-124

USACE Shore protection manual USACE, 1984

Dean, R. & Dalrymple, R. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists World Scientific Publishing Company, 1991

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Provedte měření větrových oscilačních vln na vodní nádrži, měření zpracujte, provedte analýzu dat a sepište do zprávy.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá otázkou měření větrových oscilačních vln na nádržích, zejména s ohledem na stanovení vlastností vln se zaměřením na stanovení prostorového vlnového spektra. V práci jsou uvedeny základy teorie vzniku a šíření větrových oscilačních vln, rešerše měřicích zařízení a popis pilotního měření se zpracováním naměřených dat v prostředí MATLAB za použití softwarového toolboxu WAFO. V příloze na CD jsou přiloženy vzorové skripty pro zpracování dat z odporového snímače.

KLÍČOVÁ SLOVA

Oscilační vlny, perioda, amplituda, výška vlny, spektrální hustota, směrové spektrum, odporový snímač, WAFO, MATLAB, ČSN 75 0255.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the measurement of wind oscillation waves on reservoirs, especially with regard to the determination of wave properties with a focus on the spectral density. The thesis presents the basics of the theory of creation and propagation of wind oscillation waves, the recherche of measuring devices and a description of the pilot measurement with the processing of measured data in the MATLAB environment using the software tool WAFO. Attached to the CD are sample scripts for data processing from the resistance sensor.

KEYWORDS

Oscillation waves, period, amplitude, wavelength, spectral density, directional spectrum, resistance sensor, WAFO, MATLAB, ČSN 75 0255.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Stanislav Kotaška Měření větrových oscilačních vln na nádrži. Brno, 2018. 76 s., 1 CD s. příl.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí
práce Ing. Miroslav Špano, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2019

Bc. Stanislav Kotaška
autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 10. 1. 2019

Bc. Stanislav Kotaška
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Miroslavu Španovi Ph.D., a za pomoc při psaní diplomové práce. Za cenné rady a připomínky, ochotu a čas při vypracování diplomové práce

OBSAH

1	ÚVOD	4
2	CÍLE PRÁCE	5
3	ÚVOD DO PROBLEMATIKY VĚTROVÝCH OSCILAČNÍCH VLN	6
3.1	Oscilační vlny	6
3.2	Definice parametrů vlny	6
3.3	Definice amplitudy a výšky vlny	7
3.4	Definice periody vlny.....	8
3.5	Periodické signály.....	8
3.6	Spektrální hustota výkonu.....	11
3.7	Naměřené parametry vln	11
3.8	Gaussovy procesy ve spektrální oblasti.....	12
3.9	Nejdůležitější charakteristiky vln.....	13
4	PRINCIPY MĚŘENÍ VĚTROVÝCH OSCILAČNÍCH VLN NA HLADINĚ.....	16
4.1	Ponorné tlakové senzory	16
4.2	Bóje	17
4.3	Plovoucí bóje (Oběžné bóje).....	17
4.4	Roztečné, rotační a těžké bóje.....	18
4.5	GPS Bóje.....	19
4.6	Akustická měřicí zařízení.....	19
4.7	Akustický Dopplerův proudový profilor (ACDP)	20
4.8	Radar	21
4.9	Optická měřicí zařízení.....	21
4.10	Kapacitní snímač	22
4.11	Odporový (vodivý) snímač	24
4.11.1	senzor AMR.....	25

5	POPIS ZAŘÍZENÍ SYSTÉMU PRO MĚŘENÍ VLNOVÝCH UDÁLOSTÍ	26
5.1	Přehled komponent systému pro dlouhodobé zaznamenávání dat.....	26
5.2	Popis jednotlivých prvků měřicího systému pro dlouhodobé zaznamenávání dat.....	27
5.2.1	Raspberry Pi2	27
5.2.2	Arduino UNO	27
5.2.3	Milone eTape Liquid Level Sensor	28
5.2.4	Anemometr WindETH.....	28
5.2.5	USB kamera	29
5.2.6	Modem USB.....	29
5.2.7	Solární Systém napájení.....	29
5.2.8	Vzdálený přístup	31
5.3	Popis pilotní měřicího systému sběru a přenosu dat.....	32
6	PILOTNÍ TEST MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ V LABORATOŘI A NA NÁDRŽI V BRNĚ ...	33
6.1	Pilotní měření v laboratoři LVV FAST VUT.....	33
6.2	Měření na vodní nádrži brno.....	33
6.3	Opětovný test v laboratoři.....	35
7	POSTUP ZPRACOVÁNÍ DAT Z MĚŘICÍHO SYSTÉMU	37
7.1	Popis m-souboru.....	37
7.2	Seřazení a zpracování dat (funkce M-souboru).....	38
7.2.1	Načtení dat a nastavení výstupu.....	38
7.2.2	Převedení a standardizování času a hloubek	38
7.3	Výpočet (funkce M-souboru)	39
7.3.1	Odhad spektra směrových vln	39
7.3.2	Odhad jednostranné spektrální hustoty	40
7.3.3	Vyhodnocení spektrální charakteristiky a jejich kovariací.....	40
7.3.4	Vyhodnocení spektrální směrové charakteristiky	40
7.3.5	Vytažení výšek a strmosti vln z naměřených a zpracovaných dat.....	41
7.3.6	Výpočet charakteristik vln.....	42
7.3.7	Vytvoření histogramu rozdělení výšky vln.....	42
7.3.8	Vyvolání vypočtených dat a jejich uložení	45
7.4	Výstup z MATLABu (M-souboru).....	46
7.5	Závěr z pilotních měření	48
8	IDEOVÝ NÁVRH KONSTRUKCE PRO OSAZENÍ MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ	49
8.1	Trojboký jehlan.....	50
8.2	Konstrukce s podstavou z HEB profilů.....	50

8.3	Konstrukce s podstavou z betonové desky	51
8.4	Systémové lešení - Návrh s konkrétní aplikací v těžební laguně pískovny v Hulíně	51
9	NÁDRŽ HULÍN	53
9.1	Základní údaje o území.....	53
9.1.1	Hydrogeologické a geomorfologické podmínky	53
9.1.2	Klimatické podmínky	55
9.1.3	Větrné podmínky.....	55
9.2	Výpočet výšky vln na nádrži Hulín pro základní směry	56
9.2.1	Efektivní délka rozběhu vln.....	56
9.2.2	Stanovení základních parametrů vln	57
9.2.3	Směr 1	58
9.2.4	Směr 2	59
9.2.5	Směr 3	59
9.2.6	Směr 4	60
9.3	Místo měření	60
9.3.1	Výpočet výšky vln na nádrži Hulín pro zvolený svah.....	61
9.3.2	Zaměření svahu nádrže	62
9.1	finální návrh konstrukce pro dlouhodobé měření v těžební laguně pískovny v Hulíně.....	63
10	ZÁVĚR	64
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	66
11.1	Seznam použitých zkratek.....	66
11.2	Seznam použitých symbolů	66
12	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	70
13	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	72
14	SEZNAM TABULEK.....	75
15	SEZNAM PŘÍLOH	76

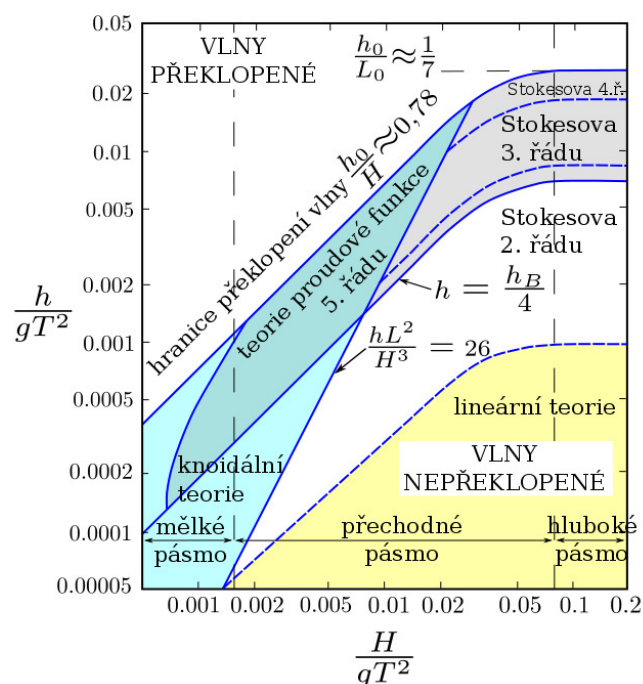
1 ÚVOD

V České Republice se výpočtem účinku větrových oscilačních vln na vodní stavby a přirozené břehy nádrží zabývá norma ČSN 75 0255 „Výpočet účinků vln na stavby na vodních nádržích a zdržích“, která byla vydána v roce 1987. Norma vychází z informací a stavu poznání z období před 30 lety. Od té doby se rozšířily jak možnosti měření a zpracování dat, tak výpočetní možnosti a možnosti simulace účinků vln na konstrukce a stavby. Rovněž doporučení pro návrh opatření pro ochranu staveb a břehů nádrží se s postupným vývojem nových materiálů a výrobků se rozšiřují, což vede k potřebě doplňovat informace o účincích zatížení vlnami.

Norma ČSN 75 0255 se opírá o předpoklad vzniku jednoduchých sinusových vln s platností lineární teorie šíření vln. Ve skutečnosti však na nádržích vzniká v důsledku působení větru pole náhodných vln, které se šíří po vodní hladině. Při splnění určitých podmínek (obr. 1 - hloubka vody, strmost vln) lze předpokládat, že vztahy mezi parametry vln lze stále dostatečně věrohodně popsat lineární teorií šíření vln [21]. Posun ve stanovení parametrů vln se týká spektra vln a spektrálních charakteristik vlnového pole, o které se v současnosti návrh konstrukcí a ochranných opatření opírají.

Výchozí informace o vzniku větrových oscilačních vln a odhad jejich parametrů uvedených v ČSN 75 0255 se opírá o výsledky výzkumů prováděných především u mořských pobřeží. Současné možnosti měřicí techniky však umožňují provádět detailní měření i na uzavřených nádržích s relativně malou výškou vln (do 1 m), proto vznikl i projekt TA03030182 s názvem: „Ochrana konstrukcí vodních staveb a přirozených břehů před účinky oscilačních větrových vln,“ z něž vychází i zadání této práce. Jednou z řešených otázek je tedy i stanovení spektra vln vznikajících na uzavřených vodních nádržích.

Výsledky měření na nádrži umožní individualizovat ochranná opatření proti účinkům větrových oscilačních vln. Umožní správné zadání okrajových podmínek při modelování vln, a to jak v případě aplikace na fyzikálních modelech, tak i v případě aplikace v numerických modelech. Přesné (individuální) stanovení výšky vln umožní přesnější stanovení účinků zatížení staveb vlnami na konkrétní nádrži a s tím spojené možnosti přerozdělení objemů v nádrži a přesnější stanovení mezní bezpečné hladiny.



Obr. 1 Orientační platnost teorií šíření vln. [21]

2 CÍLE PRÁCE

Svahy na vodních nádržích jsou opakovaně a mnohonásobně zatěžovány oscilačními vlnami, vyvolanými ať už vodní dopravou nebo povětrnostními vlivy. Protože v poslední době je stále více kladen důraz na individualizaci návrhů spojenou s efektivním využitím finančních prostředků na investice do ochranných opatření, je tato práce zaměřená na měření vlastností vln na nádrži, z nichž lze usuzovat na míru zatížení vodních staveb a přirozených břehů nádrží.

Jedním z hlavních cílů měření vln na nádržích je stanovení vztahu mezi účinky větru a vlnovým spektrem.

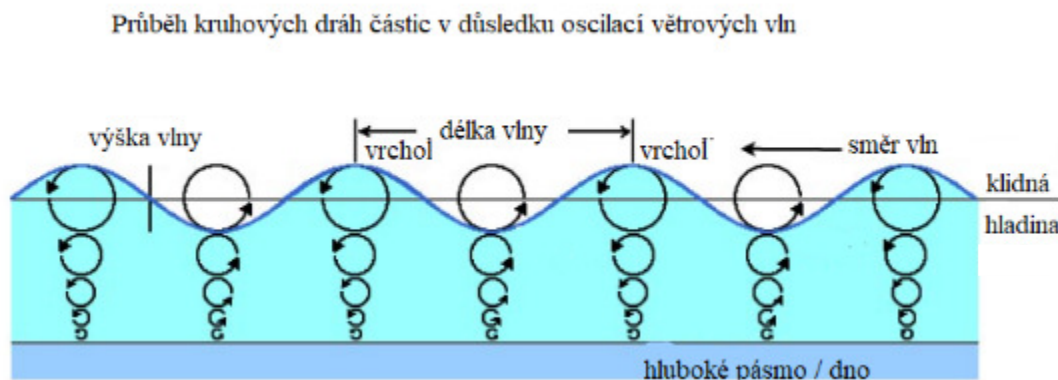
Cíle této práce jsou:

- vysvětlení základní problematiky měření vln a zpracování měřených dat,
- provést rešerši o dostupných měřicích systémech, které jsou vhodné na měření vln na nádržích,
- popsat a odzkoušet vhodné měřicí zařízení vyvíjené v rámci projektu TA03030182 na měření vln na nádržích s výškou měřených vln do 1 m a zaznamenaná data zpracovat,
- vytvořit popsat M-soubor pro automatizované zpracování naměřených dat v prostředí MATLAB,
- sepsat požadavky a provést ideový návrh konstrukce pro osazení měřicího systému v nádrži s konkrétní aplikací v těžební laguně pískovny v Hulíně,
- provést základní rešerši o území a odhad parametrů vln na hladině těžební laguny pískovny v Hulíně dle normy ČSN 75 0255.

3 ÚVOD DO PROBLEMATIKY VĚTROVÝCH OSCILAČNÍCH VLN

3.1 OSCILAČNÍ VLNY

Oscilační vlny vznikají kmitáním vodních částic v uzavřených drahách, kdy nedochází k přemísťování vody ve vodorovném směru [5]. Oscilační vlny mohou vznikat na klidné hladině nebo i na hladině se pohybující vlivem nejrůznějších vnějších vlivů. Jedním ze základních jevů je působení větru.



Obr. 2 Rovnoměrné oscilační vlny [7]

Při pohybu na hladině vody opisují jednotlivé částice kruhové dráhy. U částic na povrchu tento poloměr kružnice je roven jedné polovině výšky vlny ($r = h/2$). Směrem ke dnu nebo hlubokému pásmu vody se poloměr kruhové dráhy částice exponenciálně zmenšuje. [6]

3.2 DEFINICE PARAMETRŮ VLN

Vlna vyvolaná větrem vzniká rotačním pohybem částic vody při hladině. Částice vody rotují na místě, zatímco tvar vlny se přesouvá ve směru větru. Nejvyšší špička vlny se označuje jako vrchol vlny, nejnižší bod jako úžlabí. Místo, kde se částice vody nachází na původním místě klidné hladiny, se nazývá hřeben vlny. Základními parametry vln jsou [5]:

- výška vlny, obecně definovaná jako svislá odlehlost mezi vrcholem a úžlabím vlny,
- délka vlny, která je definovaná jako vzdálenost mezi dvěma vrcholy vlny,
- perioda vlny, která je definována jako doba oběhu částice vody po orbitě.

V přírodě však rovnoměrné vlny vznikají jen výjimečně, proto je třeba k parametrům vln přistupovat jako k charakteristikám popisujícím náhodný proces.

Níže jsou uvedeny základní a některé další parametry vln, které lze vyčíst z měření polohy hladiny vody:

- 1) Názvosloví vlny
 - Úžlabí vlny (t) je definováno jako část vlny pod úrovní hladiny v klidu (Obr. 3).
 - Vrchol vlny (c) je definován v profilu vlny jako nejvyšší bod jejího hřebene (Obr. 3).

- Střednice vlny ($d; u$) je definována v profilu vlny jako vodorovná čára vedená tak, že v profilu vlny pólí její výšku (Obr. 3). [5]

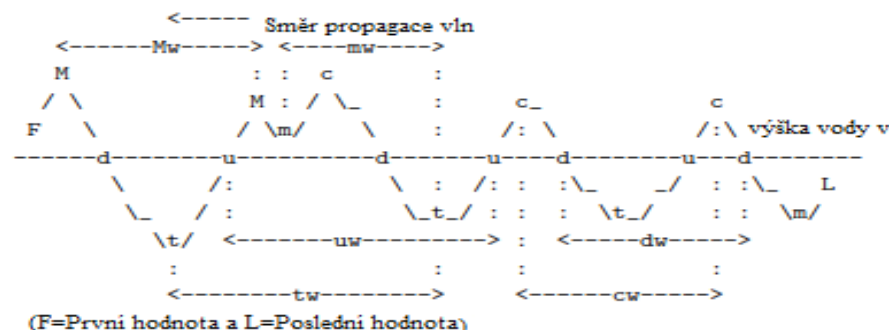
2) Definice úrovně dolní a horní vlny

- Úroveň dolní vlny (dw) je vymezena od střednice klesající části (d) vlny po následující střednici klesající části (d) vlny (Obr. 3).
- Úroveň horní vlny (uw) je vymezena od střednice stoupající části (u) vlny po následující střednici stoupající části (u) vlny (Obr. 3). [3]

3) Definice délky vlny

Délka vlny je definována jako vodorovná vzdálenost dvou vrcholů sousedních vln.

- Úžlabní délka vlny (tw) je vymezena od paty části (t) vlny po následující patu části (t) vlny (Obr. 3).
- Vrcholová délka vlna (cw) je vymezena od vrcholové části (c) vlny po následující vrcholovou část (c) vlny (Obr. 3). [3]
- Délka vlny minima (mw) je definována od lokálního minima části (m) vlny a končí v následující patě části (t) vlny (Obr. 3).
- Délka vlny lokálního maxima (Mw) je vlna od lokálního maxima části (M) vlny do dalšího lokálního maxima další části (M) vlny (Obr. 3). [3]



Obr. 3 Definice parametrů vln [3]

3.3 DEFINICE AMPLITUDY A VÝŠKY VLNY

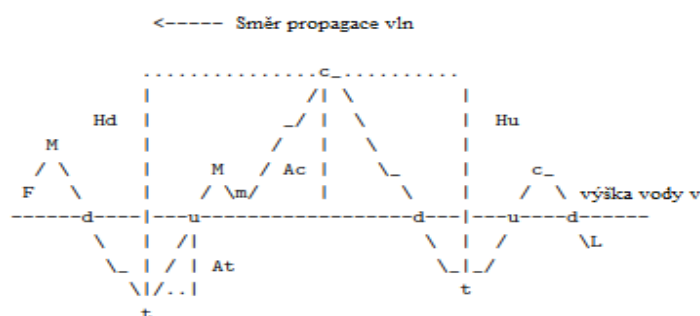
Amplituda (též výkmit či rozkmit) je maximální hodnota periodicky měnící se veličiny. Výška vlny je definovaná jako vzdálenost mezi vrcholem a úžlabím. Níže jsou uvedeny tyto a další parametry vln.

A_c = amplituda výkyvu.

A_t = minimální amplituda.

H_d = výška vlny, jak je definována pro vlny s přechodem dolů.

H_u = výška vlny, jak je definována pro vlny s přechodem nahoru.[3]



Obr. 4 Definice amplitudy a výšky vlny [3]

3.4 DEFINICE PERIODY VLNY

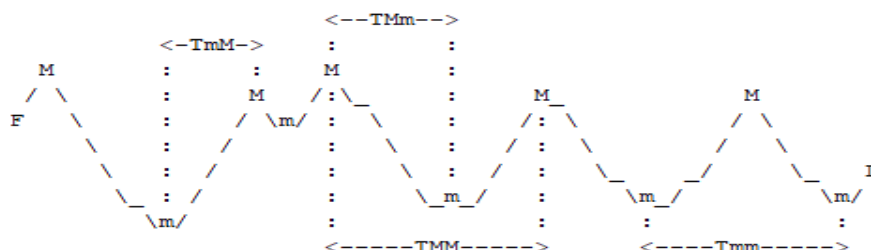
Perioda vlny je definována mezi průchodem dvou za sebou postupujících vrcholů vln danou svislicí. U stojaté vlny je to doba, po jejímž uplynutí se celý průběh kmitání opakuje. [5]. Máme mnoho druhů period vln, záleží, z jakého bodu a do jakého bodu chceme periodu určovat. Při našem výpočtu je nejdůležitější perioda s označením T_{MM} = perioda z maxima (M) vlny po následující maximum (M) vlny (Obr. 5), kterou používáme pro výpočet vytažení výšek a strmosti vln z naměřených a zpracovaných dat. Níže jsou uvedeny základní a některé další druhy period vln:

T_{mM} = perioda z minima (m) vlny po následující maximum (M) vlny (Obr. 5).

T_{Mm} = perioda z maxima (M) vlny po následující minimum (m) vlny (Obr. 5).

T_{MM} = perioda z maxima (M) vlny po následující maximum (M) vlny (Obr. 5).

T_{mm} = perioda z minima (m) vlny po následující minimum (m) vlny (Obr. 5). [3]

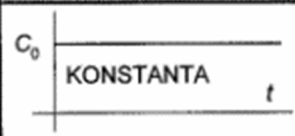
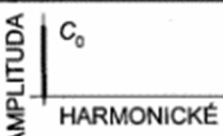
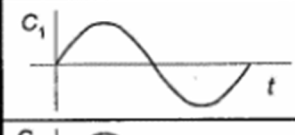
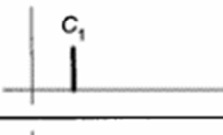
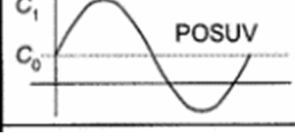
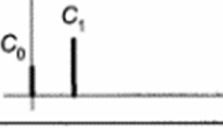


Obr. 5 Definice period vln [3]

3.5 PERIODICKÉ SIGNÁLY

V ČSN 75 0255 se při výpočtu postupových vln vychází z teorie malé amplitudy, při které se předpokládá sinusový profil vlny a střednice vlny se ztotožňuje s hladinou vody. [5] Funkce vln, které se analyzují, mohou být naměřené ve formě namáhání nebo napětí, které nazýváme zatížení, případně je můžeme označit i jinou veličinou. Předpokládáme, že nejdůležitější měřené zatížení jsou vlny na povrchu kapaliny. Signál je plně popsán časovým průběhem (tak jak je vidíme na záznamu z měření) a můžeme ho dělit na periodické a neperiodické. V obou případech je lze popsat spektrálně – určit jaké kmitočty v sobě obsahuje. Pro popis signálů bylo využito Fourierovy transformace. [3]

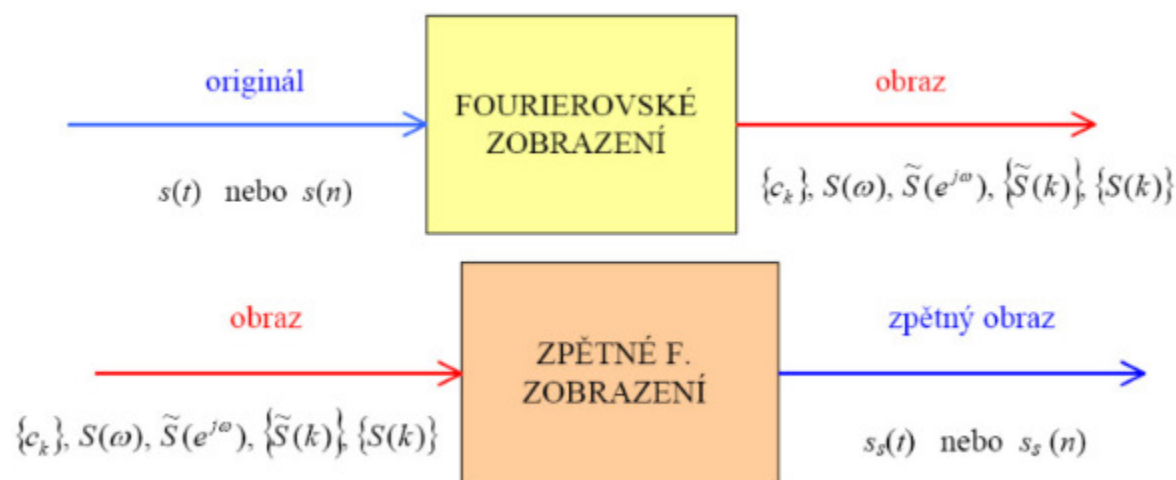
Použití Fourierovy transformace v analýze lineárních systémů je široce rozšířené a často vede k velké úspoře práce, pokud jsou používány metody s principem měření úhlové frekvence. Hlavním zjednodušením je, že integrační konvoluce metod časové domény se nahradí jednoduchým násobením. [3]

PRŮBĚH SIGNÁLU	FOURIERŮV ROZVOJ	SPEKTRUM
	$y = C_0$	
	$y = C_1 \sin \alpha$; kde $\alpha = \omega t$	
	$y = C_0 + C_1 \sin \alpha$	

Obr. 6 Výřez z tabulky Fourierova rozvoje pro různé funkce [9]

Fourierovu transformaci si můžeme představit jako spektrum harmonických periodických signálů, jež nejsou spojité. Mluvíme tak o Fourierově řadě, a tedy libovolný periodický signál můžeme rozložit a složit z mnoha sinových a kosinových funkcí o stejnoměrné složce. Tyto funkce mají harmonické složky, které jsou definované jako kmitočty, které jsou rovny celistvým násobkům základního kmitočtu periodického signálu. Každá složka má svou frekvenci, amplitudu a počáteční fázi. Jejich amplitudy jsou dány koeficienty Fourierova rozvoje.

Převod mezi časovou a kmitočtovou doménou se nazývá Fourierovské zobrazení, nazpět pak zpětné Fourierovské zobrazení (zpětná transformace). [9]



Obr. 7 Převod mezi kmitočtovou a časovou doménou [9]

Fourierovské zobrazení slouží pro převod naměřené frekvence na spektrální hustotu $S(\omega)$, která slouží ke zpětnému vytvoření vln v laboratoři principem zpětného zobrazení Fourierovy řady.

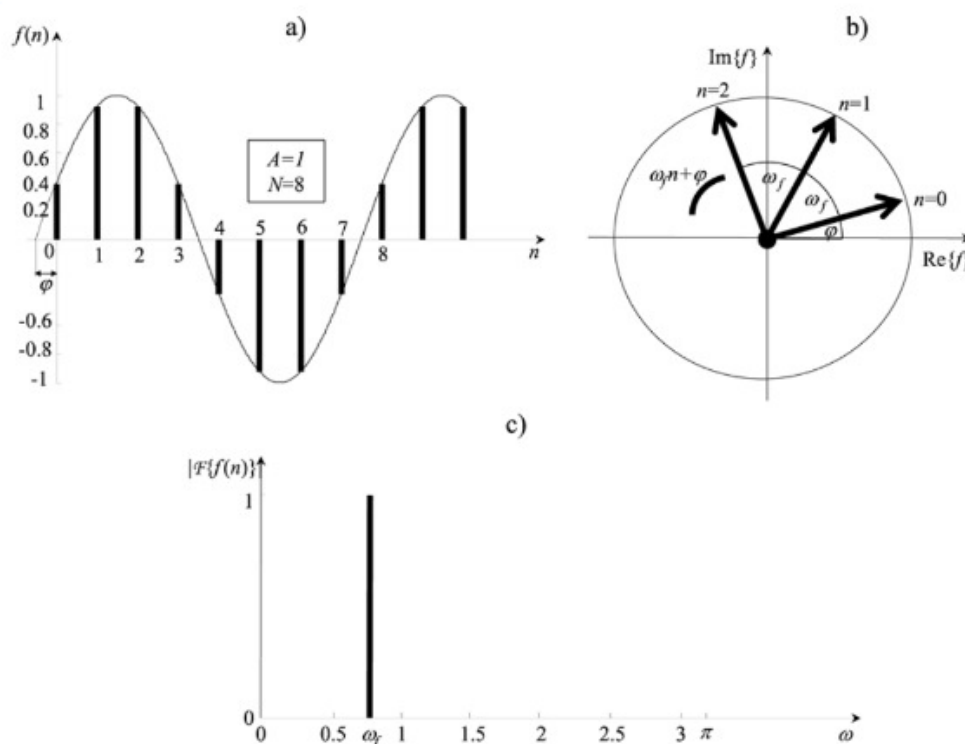
Ke zpracování frekvenčních složek, které jsme naměřili budeme přistupovat jako k rotujícím vektorům, jelikož se jedná o oscilační vlny s periodickým průběhem vln. [7]

Předpokládejme, že $x(t)$ je signál spojitý se základní frekvencí f . Pro další úvahy je vhodné využít analogie s otáčivým pohybem a použít kruhovou frekvenci $\omega=2\pi f$. Takový signál lze rozložit na součet fázově posunutých sinusových složek o frekvencích f , $2f$, $3f$, atd. (Obr.7). Zapsáno matematicky, signál $x(t)$ a se základní frekvencí ω lze napsat dle [7] následujícím způsobem:

$$x(t) = \sum_{n=1}^{+\infty} (A_n * \sin(n\omega t + \varphi_n)) \quad (3.1)$$

Poznamenejme, že rovnost neplatí obecně. Suma na pravé straně rovnice se označuje jako Fourierova řada. Matematický postup, kterým se naleznou koeficienty A_n a φ_n , se nazývá Fourierova transformace. Tvar se sinem je pro výpočet nepohodlný a Fourierova transformace lze tedy psát dle [7] i následujícím způsobem:

$$x(t) \approx \sum_{i=1}^{+\infty} (a_i * \cos(\omega_i * t) + b_i * \sin(\omega_i * t)) \quad (3.2)$$



Obr. 8 Grafická znázornění harmonické časové řady a veličin, které určují její průběh. a) Harmonická časová řada. b) Rotující fázor v komplexní rovině. c) První půlperioda amplitudového frekvenčního spektra harmonické časové řady. [8]

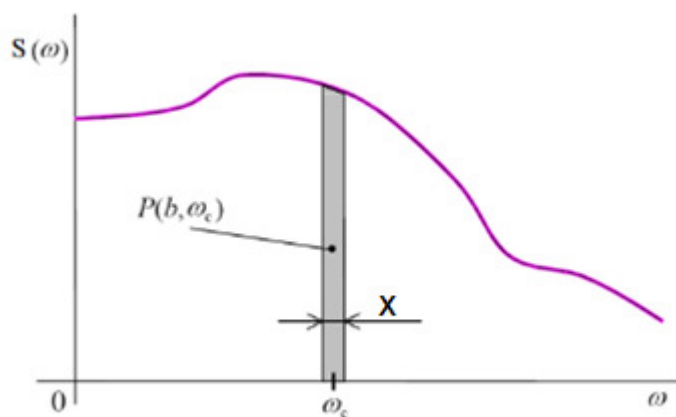
3.6 SPEKTRÁLNÍ HUSTOTA VÝKONU

Na spektrum signálu se lze dívat jako na funkci, která nám říká, jaká část výkonu je nesena, jakými frekvenčními složkami: je to funkce spektrální hustoty výkonu. Celkový výkon přenášený signálem se vypočítá jako integrál spektrální hustoty výkonu od $-\infty$ do $+\infty$. [3]

Hledáme výkonné spektrum, které je nejdůležitější charakteristikou signálů ve frekvenční oblasti. Výkonné spektrum je dáno rovnicí $S = (a_i^2 + b_i^2 / 2\Delta\omega)$ kde $\Delta\omega$ je vzorkovací interval ve frekvenční oblasti, tj. $\omega_i = i * \Delta\omega$. Dvoustupcová matice $S(\omega_i) = (\omega_i, S_i)$ se nazývá spektrum výkonu $x(t)$. V roce 1898 byl zaveden alternativní termín periodogram německým fyzikem Arthurem Schustrem. [3] Sekvence θ_i je taková že $\cos \theta_i = a_i / \sqrt{2 * S_i * \Delta\omega}$ a $\sin \theta_i = -b_i / \sqrt{2 * S_i * \Delta\omega}$ se nazývá posloupnost fází. Fourierova řada je potom zapsána dle [3] takto:

$$x(t) \approx m + \sum_{i=1}^N (\sqrt{2 * S_i * \Delta\omega} * \cos(\omega_i * t + \theta_i)) \quad (3.3)$$

Spektrální hustota výkonu PSD (Power spectral density) značí výkon v tenkém výseku x spojitého spektra. (Obr. 9). [8]



Obr. 9 Spektrální hustota výkonu [8]

Poslední integrál se nazývá spektrální moment m_n . Podobně jako spektrální momenty vyšších řádů je dán vztahem:

$$m_n = \int_0^{+\infty} \omega^n S(\omega) d\omega \quad (3.4)$$

3.7 NAMĚŘENÉ PARAMETRY VLN

Funkce vln, které se analyzují, mohou být naměřené ve formě namáhání nebo napětí, které nazýváme zatížení, případně jinými veličinami. Předpokládáme, že nejdůležitější měřené zatížení jsou vlny na povrchu kapaliny. Naměřené údaje jsou uvedeny v jedné z následujících forem:

1. V časové oblasti měření funkce odezvy označené $x(t)$, $0 \leq t \leq T$, kde t je čas a T je doba měření. U funkce $x(t)$ se obvykle měří vzorkovací frekvence a dané rozlišení, tj. hodnoty x

(t) jsou diskretizovány. Efekty odběru vzorků nelze vždy zanedbat při odhadu parametrů nebo rozdělení. Předpokládáme, že měřené funkce jsou ukládány jako dva sloupce ASCII nebo jako matice. Některé obecné vlastnosti měřených funkcí lze shrnout pomocí několika jednoduchých vlastností. Tyto vlastnosti jsou střední hodnoty m , které jsou definovány jako průměr všech hodnot, standardní odchylka σ a odchylka σ^2 , která měří variabilitu kolem průměru v lineárním a kvadratickém měřítku. Tato množství se odhadují podle:

$$m = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt, \quad (3.5)$$

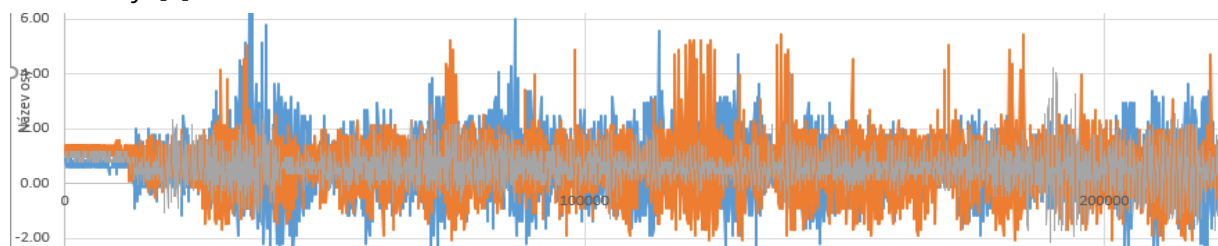
$$\sigma^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - m)^2 dt, \quad (3.6)$$

pro nepřetržité zaznamenávání měření nebo odpovídající část vzorkovaného měření zatížení.

2. Ve frekvenční oblasti, jako výkonové spektrum, které je důležitým modelem pro analýzu systémů. To znamená, že signál je představován Fourierovou transformací:

$$x(t) \approx m + \sum_{i=1}^N (a_i * \cos(\omega_i * t) + b_i * \sin(\omega_i * t)) \quad (3.7)$$

Kde $\omega_i = i * 2\pi/T$ je úhlová frekvence, m je střední hodnota signálu a a_i a b_i jsou Fourierovy koeficienty. [3]



Obr. 10 Graf naměřených dat ze 3 odporových pásek

3.8 GAUSSOVY PROCESY VE SPEKTRÁLNÍ OBLASTI

V předešlé části kapitoly byly popsány vlastnostmi jednoho specifického signálu ve frekvenční oblasti. Předpokládejme nyní, že dostaneme řadu 3 měření signálu, které jsme ochotni považovat za rovnocenné prvním. Nicméně všechny tři série měření jsou zřídka kdy totožná a je přirozené tyto měření považovat za čistě náhodné. Měření na 3 odporových páskách bude mít rozdílné fáze a spektrum $\hat{S}(\omega)$ (Obr. 10). [3]

Matematickým modelem pro takovou situaci je náhodná funkce (stochastický proces), označený $X(t)$. Pak $x(t)$ jako „viděná“ je zejména náhodně zvolená funkce. Nejjednodušší model pro výpočet stacionárního signálu s pevným spektrem $S(\omega)$ je:

$$X(t) = m + \sum_{i=1}^N (\sqrt{\hat{S}_i * \Delta\omega} * \sqrt{2} * \cos(\omega_i * t + \theta_i)) \quad (3.8)$$

kde fáze θ_i jsou náhodné proměnné, nezávislé, rovnoměrně rozložené mezi 0 a 2π .

Toto není moc realistický model, jelikož v praxi se zaznamenávaná variabilita spektrální amplitudy $S(\omega)$ mezi měřenými funkcemi. [3]

Nejlepší způsob, jak se s realistickým modelem vypořádat je předpoklad že existuje deterministická funkce $S(\omega)$ jejíž průměrná hodnota $\hat{S}(\omega_i)\Delta\omega$ mnoha zaznamenaných dat může být aproximována pomocí $S(\omega_i)\Delta\omega$. Ve skutečnosti lze v mnoha případech modelovat variabilitu $\hat{S}(\omega_i)$ jako:

$$\hat{S}(\omega_i) = R^2 * S(\omega_i)/2 \quad (3.9)$$

kde R_i je nezávislý náhodný faktor s distribucí Rayleigh s pravděpodobností hustoty funkce $f_R(r) = r * \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right), r > 0$. Toto dává následující náhodnou funkci jako model pro sérii:

$$X(t) = m + \sum_{i=1}^N (\sqrt{S_i * \Delta\omega} * R_i * \cos(\omega_i * t + \theta_i)) \quad (3.10)$$

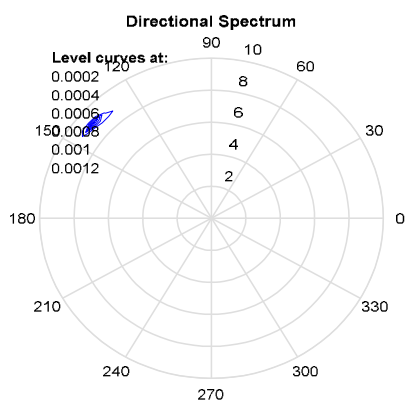
Proces $X(t)$ má mnoho užitečných vlastností, které lze použít pro analýzu. Zejména, pro každý pevný t , $X(t)$ je funkce normálně distribuována (Gaussovo rozdělení). Pak pravděpodobnost jakékoli události definované pro $X(t)$, lze vypočítat při známo průměrné hodnotě m a známé spektrální hustotě $S(\omega)$. [3]

3.9 NEJDŮLEŽITĚJŠÍ CHARAKTERISTIKY VLN

Nejdůležitějšími sledovanými charakteristikami při zpracování dat oscilačních vln je spektrální hustota $S(\omega)$ a spektrální moment m .

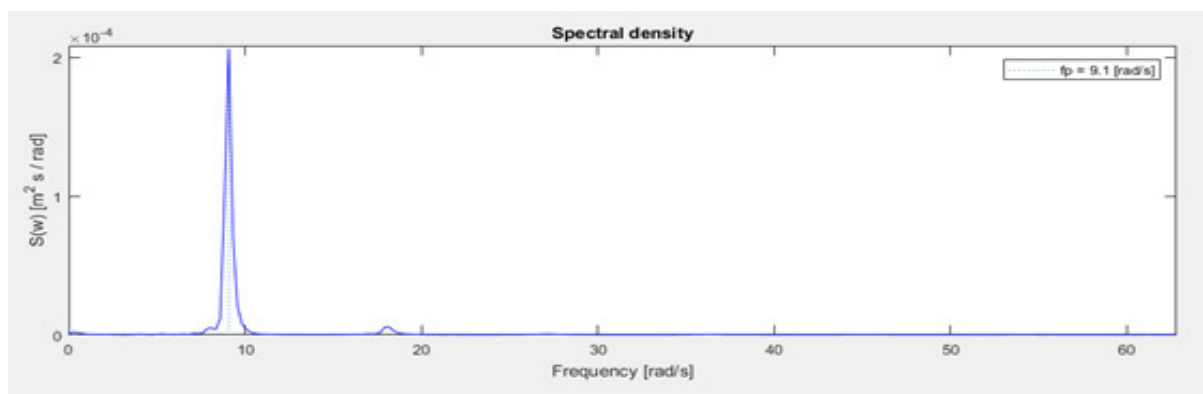
Nejdůležitějšími vypočtenými charakteristikami je počet vln N , charakteristická výška vlny H_{m0} , výška překročení vlny s pravděpodobností 1% H_{1p} , výška překročení vlny s pravděpodobností překročení 13% H_{13p} , vrcholová perioda T_p , střední perioda vlny T_{m01} , střední perioda vlny procházející nulou T_{m02} , perioda energie T_{m10} , směr a disperze vln.

- 1) Směrové spektrum energie – určuje nám převládající směr vln.



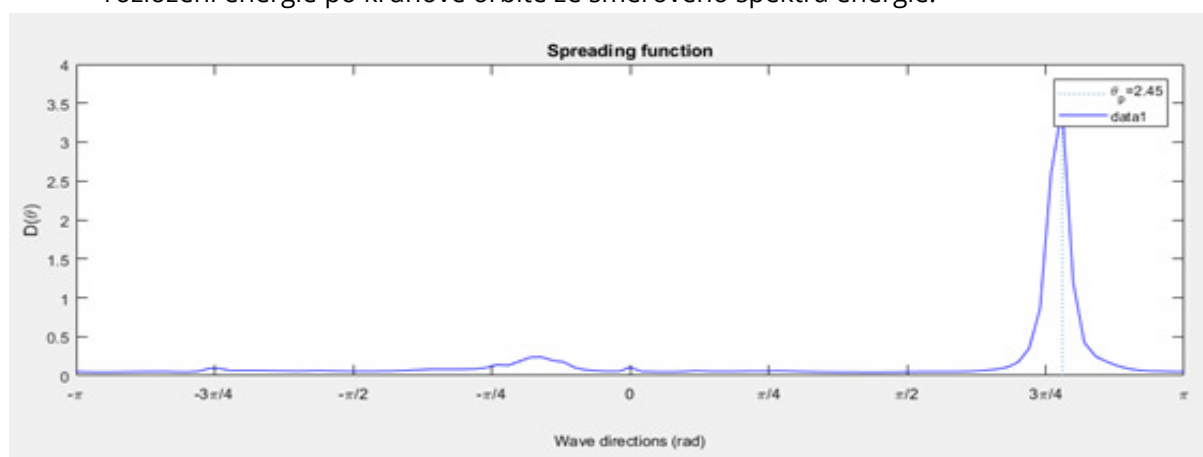
Obr. 11 Směrové spektrum energie

2) Vrcholová spektrální hustota – jedná se o řez vedený směrovým spektrem energie.



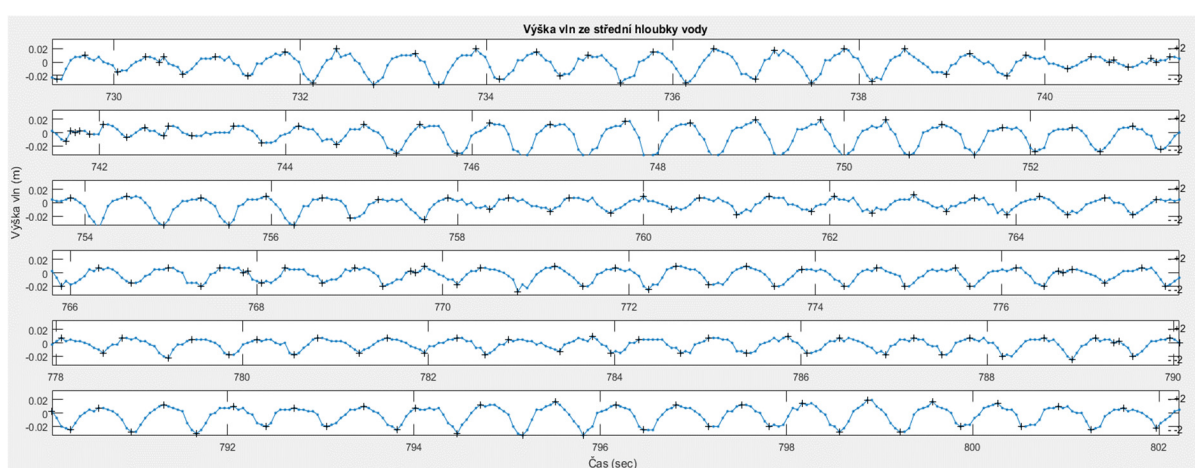
Obr. 12 Vrcholová spektrální hustota (Peak)

3) Rozšiřující funkce spektrální hustoty – jedná se o rozložení směru energie od $-\pi$ do π , tedy rozložení energie po kruhové orbitě ze směrového spektra energie.



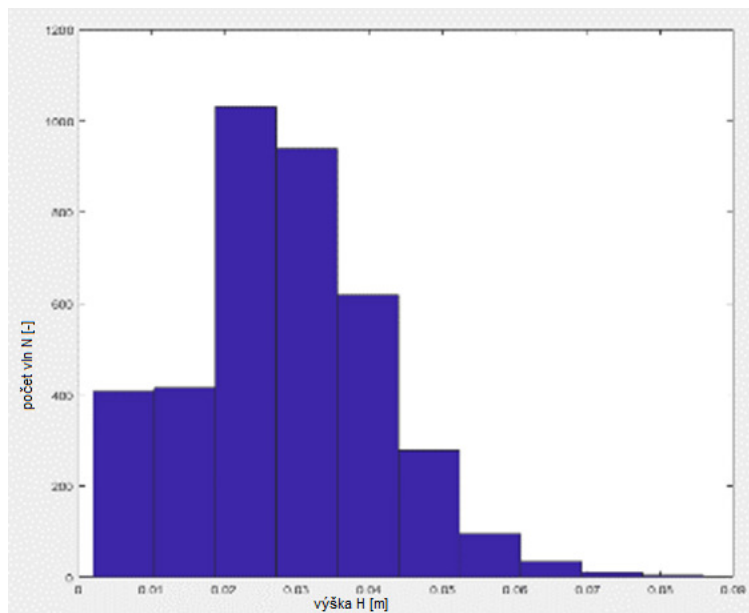
Obr. 13 Rozložení směru energie po kruhové orbitě

4) Průběh vln v určitém časovém intervalu z paty do vrcholu (z minima do maxima)



Obr. 14 Průběh vln v časovém intervalu z minima do maxima

- 5) Histogram četnosti výskytu vln – zobrazení výskytu vln. Na x ose je výška vlny H [m] a na ose y počet vln N [-].



Obr. 15 Histogram četnosti výskytu vln

4 PRINCIPY MĚŘENÍ VĚTROVÝCH OSCILAČNÍCH VLN NA HLADINĚ

Cílem následující kapitoly je rešerše základních informací o dostupných měřících systémech, které jsou vhodné na měření vln na hladině nádrží. Budou zde prezentovány zařízení běžně využívaná na mořské vlny, jelikož v dnešní době je většina odborníků zaměřena na problematiku mořských pobřeží.

Princip měření větrových oscilačních vln na hladině nádrží, řek a hydraulických modelech vyžadují měření vln menšími amplitudami a vzorkování při vyšších frekvencích než vlny mořské, to znamená vyšší prostorový a časový krok. Zvětšující se časový krok není problém, protože je jednoduché získat více měřených dat za sekundu, ale zvýšit prostorový krok vyžaduje dostatečnou citlivost a přesnost měření, což diskvalifikuje většinu systémů vyvinutých pro měření mořských vln. V podstatě je nutné snížit velikost snímače a minimalizovat jeho nejdůležitější část, přes kterou přístroj přijímá informace o vlně. Jinými slovy je žádoucí snížit prostorovou integraci zavedenou snímačem samotným.

Pro měření vln na jezerech, řekách, vlnových nádržích a hydraulických fyzikálních modelech je zapotřebí přístroje pro měření hladiny vody v dynamických a kvazi-statických podmínkách. V těchto případech je časový krok hladiny i několik pohybů za sekundu a prostorová stupnice je v rozmezí centimetrů pro měření v terénu a v rozmezí milimetrů u fyzikálních modelů v laboratoři.

Snímače hladiny vody jsou založené na různých funkčních principech. Je snaha zvolit takové zařízení, z kterého dokážeme sestavit spektrální hustotu. Některé z nejznámějších nástrojů používaných pro měření úrovně hladiny budou popsány níže.[1]

4.1 PONORNÉ TLAKOVÉ SENZORY

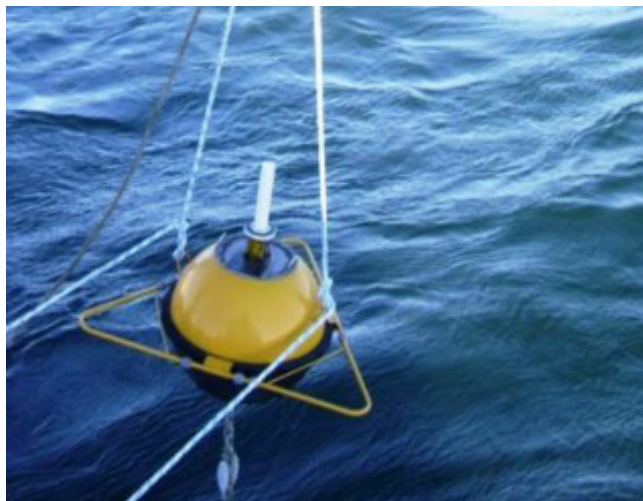
Ponorné tlakové senzory fungují na principu snímání tlaku pod vodou. Při použití pro vyhodnocení vlnových polí zaznamenávají dynamický tlak vyvolaný změnou výšky vody průchodnou vlnou a průměrný hydrostatický tlak způsobený vodním sloupcem pod úrovní hladiny vody. Ponorné tlakové senzory se obvykle montují v konstantní hloubce na molo nebo plošinu ukotvenou ve dně oceánu. Montáž snímače hraje důležitou roli v kvalitě naměřených dat. Vzhledem k tomu, že senzory jsou v určité hloubce, rychlé změny výšky hladiny moře a malé vlny nejsou zaznamenány ve vodním sloupci. Při znalosti hloubky senzoru, tlaku zaznamenaným v časové řadě za použití lineární vlnové teorie může být přeměněn výpočet na náhorní plochu hladiny v čase. Tyto senzory se používají pro orientační měření. Směr vlny se těmito senzory zjistí kombinací více senzorů v jednom místě v určitých vzdálenostech od sebe. [1]

4.2 BÓJE

Bóje se často používají pro terénní měření a jsou vhodné pro měření v hlubokém pásmu vody, protože nepotřebují plošinu nebo molo upevněné ke dnu, jako v případě ponorných tlakových senzorů. Plovoucí bóje mohou do jisté míry následovat a zachycovat pohyb povrchu hladiny. Měření posunutí bóje umožňuje změřit vlnové charakteristiky. Některé typy bóje jsou známy jako GPS, plovoucí, zvednuté nebo těžké. [1]

4.3 PLOVOUCÍ BÓJE (OBĚŽNÉ BÓJE)

Jedná se o kulové bóje s menším průměrem než 1 m. Posuvné bóje sledují moře oběžné dráhy částic povrchové vody, se kterým se mohou měřit směrová a **spektrální** vlnová data. Aby mohly bóje zachycovat pohyb vlny, musí kotvení bóje umožnit pohybovat se volně. Instalace proto vyžaduje uvolněné kotvení bóje ke dnu. Obvykle se jako část použije elastická gumová šňůra. Počáteční posunutí bójí měří parametry vln pomocí akcelerometru, který změří vertikální posun povrchu moře. Bóje přenášejí vlnové informace na pobřežní stanici jako analogový signál pomocí rádiových frekvencí. Analogové informace vlny se zaznamenávají na přijímači jednotky v pravidelných intervalech po určité období pro pozdější analýzu. S těmito informacemi jsou získány spektra nesměrových vln. Tento způsob přenosu dat omezuje maximální vzdálenost bóje k pobřeží na několik desítek kilometrů. Bóje, které sledují pohyb vlny používají pouze jeden výpočet akcelerometru vlnové výšky dvojitým integrováním vertikálního zrychlení. [1]



Obr. 16 Plovoucí bóje [1]

4.4 ROZTEČNÉ, ROTAČNÍ A TĚŽKÉ BÓJE

Jsou to velké bóje, na které se instalují oceánografické a meteorologické přístroje, určené na dlouhodobé měření bez dozoru na otevřeném moři, se kterým se mohou měřit směrová a **spektrální** vlnová data. Obvykle mají tvar disku o průměru několika metrů.



Obr. 17 Těžká bóje [20]

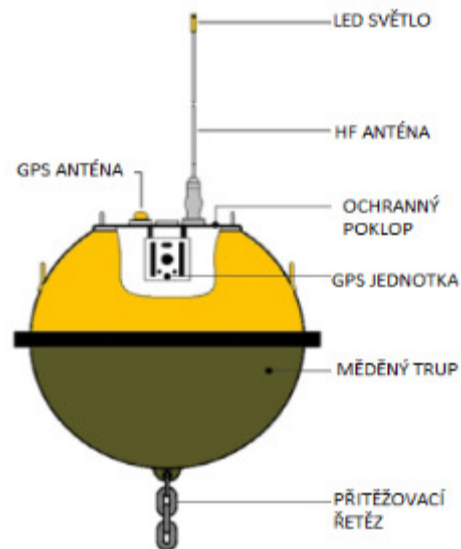
Pro měření používá jednoosý akcelerometr s měřením osy kolmé k palubě bóje. Pro dokonalé sledování sklonu bóje je osa akcelerometru kolmá na povrch vlny. Spektrální analýzy jsou odvozeny z časových řad zrychlení. Naměřené zrychlení jsou opraveny frekvenčně v závislosti na reakci trupu bóje a jeho ukotvení. Pro odhad směrového vlnového spektra jsou měřeny časové řady (pitch and roll) – roztečí a rotace bóje. Naměřené časové řady se odkazují na směr východ-západ a sever-jih pomocí magnetometru, který získá azimut bóje z měření magnetického pole země.

Moderní bóje umí analyzovat informace na palubě a odesílat na pobřeží pouze výsledky přes satelitní linku. Obecně platí že výsledky obsahují informaci o časové řadě a frekvenční oblast. Mezi další charakteristiky patří perioda odpovídající frekvenci, kde je bezesměrné spektrum maximální, průměrného a nulového přechodu periody, charakteristická výška vln, spektrum plných směrových vln, střední vlna, směr a parametry, které popisují šíření vln do hlavních směrů. [1]

4.5 GPS BÓJE

GPS bóje jsou posuvné bóje, o velikosti i menší než půl metru. Mohou být volně pohyblivé nebo ukotvené ke dnu. Jsou to bóje bez čidla pouze s GPS přijímačem, kterým se mohou měřit směrová a **spektrální** vlnová data. Platforma musí mít speciální přijímač k získání informací z několika satelitů současně, aby bylo možné vypočítat jeho polohu. Protože signály GPS neprocházejí vodou, mohou být blokovány vysokými vlnami a někdy mohou být data ztracena. Většina bójí používá jediný přijímač GPS. Jejich metoda je založena na určení rychlosti pohybu bóje. Výpočet vychází z dopplerovského posunu frekvence přijaté na bóji. Rychlost bóje je pak integrovaný odhad jeho pohybu.

Některé metody umístění bóje vyžadují diferenciální GPS strategii, která potřebuje na břehu další referenční stanici GPS. Použití této technologie je tedy omezené vzdáleností od pobřeží. [1]



Obr. 18 GPS bóje [20]

4.6 AKUSTICKÁ MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ

Akustická měřicí zařízení se používají pro terénní měření i pro měření v laboratoři, kterým se mohou měřit směrová a **spektrální** vlnová data. Obvykle jsou podle druhu provozu označovány dva druhy měřících zařízení, a to pro měření nad hladinou nebo pod hladinou vody. Měřicí zařízení nad hladinou vody se upevňují na plošiny poblíž pobřeží o několik metrů výše, než je maximální úroveň dosažitelná vlnami. Akustický převodník vysílá impulsy směrem dolů a měří dobu odrazu zvuku od hladiny vody. Ze známé rychlosti zvuku ve vzduchu se vypočítá vzdálenost k hladině vody. Vzhledem k tomu, že rychlost zvuku ve vzduchu se mění s teplotou, musí být provedena korekce výpočtu založená na měření teploty vzduchu nebo přímém měření rychlosti zvuku. Aby bylo měření co nejpresnější, je časový krok měření obvykle několik kroků za sekundu. Pro dosažení dobrého prostorového rozlišení (měření na malé ploše vlny), by měla být šířka paprsku snímače úzká. Akustické měření hladiny vody lze také provádět pomocí ponorných akustických měničů směřujících k hladině vody. Jsou umístěny na pevném místě nebo plošině v určité hloubce vody. Při vyslání signálu zvuk cestuje přes vodu na povrch a zde se odráží od hladiny vody. Tento časový krok je změřen a ze známého času je vypočtená vzdálenost k povrchu. Podvodním akustickým zařízením hrozí usazování sedimentů na snímačích. [1]



Obr. 19 Akustický senzor na měření vln [1]

4.7 AKUSTICKÝ DOPPLERŮV PROUDOVÝ PROFILOR (ACDP)

Akustický Dopplerův proudový profil (ADCP) je hydroakustický měřič proudu podobný sonaru, kterým se mohou měřit směrová a **spektrální** vlnová data, slouží k měření rychlosti proudění vody v hloubce pomocí dopplerovského efektu zvukových vln rozptýlených zpět z částic ve vodním sloupci. Pro účely měření směrových vln se používá magnetický kompas a nakloněný snímač odkazující rychlosti měření na sever-jih a východ-západ. Metoda poskytuje měření jak směrových, tak i nesměrových vln. Zásadou této metody je že může měřit rychlosti v profilech, a zároveň odhadnout oběžné rychlosti vln pod hladinou vody. Rychlost je měřena pro několik buněk v různých hloubkách a poté je zpracována do sítě buněk odkud jsou získány směrové informace. Pro převod dat z rychlosti spektra na plošný posun se využívá teorie lineárních vln. Pro zpřesnění teorie lineárních vln se využívá snímače tlaku, který měří průměrnou hloubku vody. Zároveň slouží jako druhý zdroj pro statistiku nesměrových vln. [1]



Obr. 20 Dopplerův proudový profilor [20]

4.8 RADAR

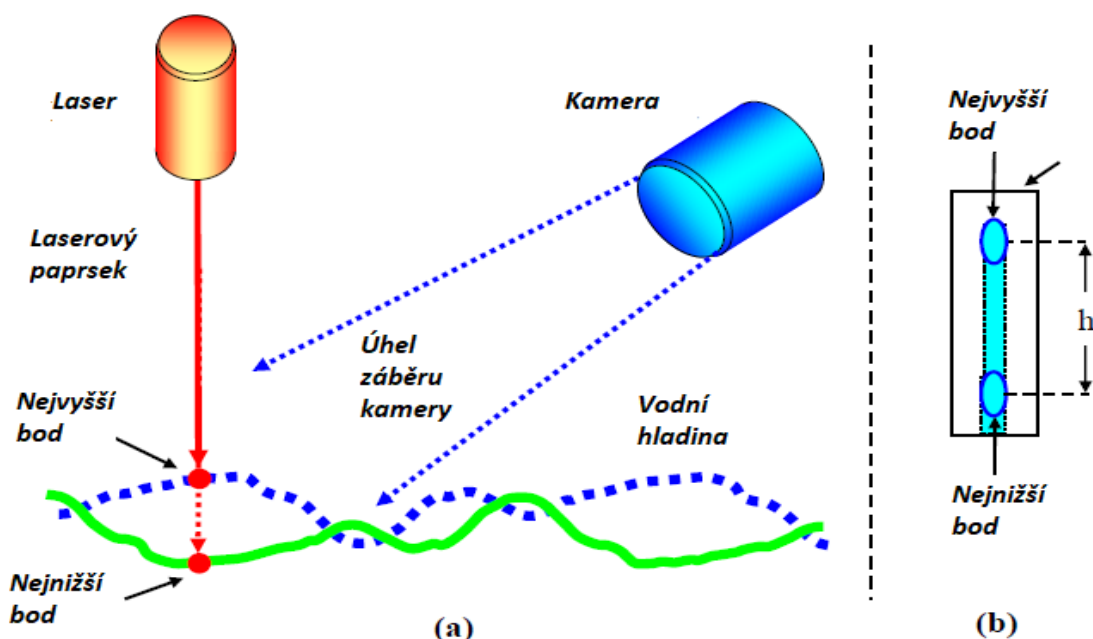
Radarové senzory fungují na podobném principu jako akustická zařízení, se kterým se mohou měřit směrová a **spektrální** vlnová data. Radary používají jako snímač rádiovou anténu směřující dolů připevněnou na plošinu poblíž pobřeží o několik metrů výše, než je maximální úroveň dosažitelná vlnami. Radarová vlna putuje směrem dolů a měří dobu odrazu zvuku od hladiny vody. V tomto případě radar vysílá elektromagnetickou vlnu, jejíž rychlost je mnohem vyšší než rychlost zvuku ve vzduchu. Jelikož je čas letu velmi krátký musí být elektronika mnohem přesnější a sofistikovanější. Radary nelze používat pod vodou z důvodu elektrických vlastností vody. Výsledky elektromagnetických vln jsou oslabeny vlastnostmi v krátkých vzdálenostech. [1]



Obr. 21 Radarový snímač vln [20]

4.9 OPTICKÁ MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ

Optické metody měření probíhají bez jakéhokoliv kontaktu s vodou, a s velkým časovým a prostorovým krokem. Principy metod jsou jednoduché, ale nahrávání a proces získávání obrazu je velice komplexní. První ze systémů sestává z laserového zdroje, jehož paprsek je instalován vertikálně a směřující dolů na vodní hladinu. Zorné pole kamery svírá určitý úhel s paprskem laseru. Relativní poloha laseru a kamery je konstantní díky tomu, že jsou nainstalovány na stejném rámu. Laserový paprsek vytváří místo na vodní hladině a kamera zaznamenává jeho odrazy, jak se voda pohybuje. Jelikož se paprskové světlo nejenom odráží ale část světla je pohlcena podpovrchovou vodou, není zaznamenán odraz dostatečně ostrý, ale rozptýlený. Po statistickém zpracování snímků je povrchová plocha odhadnuta.



Obr. 22 Princip měření optickým zařízením [1]

Kalibrace tohoto měřicího systému je dosažena vytažením laseru / kamery umístěnou svisle nad nehybnou vodní plochu. Nastavený posun se měří a ve srovnání s polohou místa na zaznamenaném obrazu. Z těchto hodnot dochází k přenosu systému. Druhý optický měřicí systém používá šikmý laserový paprsek, který tvoří světelnou clonu, která se odráží na vodní plochy a promítá se na dvou rovnoběžných vertikálních plochách. Obrazy pořízené odraženým laserovým paprskem od povrchu jsou zaznamenávány kamerou. Zpracováním obrazu ve dvou vertikálních rovinách je možné oddělit efekty způsobené hladinou vody od účinků vyvolaných sklonem. Proces zpracování a kalibrace dat je složitější než v předchozím měřicím systému. Optické systémy mají tu výhodu, že neruší povrch vody jako v případě vodivých nebo kapacitních čidel. Ale závisí na povrchu odrazu. Jakýkoliv plovoucí materiál nebo povrchová turbulence by mohly způsobit chyby měření. [1]

4.10 KAPACITNÍ SNÍMAČ

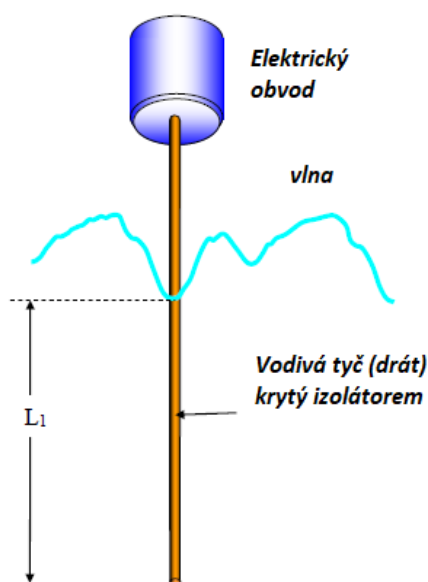
Přístroje označované jako kapacitní snímače slouží k měření hladiny na hydraulických modelech a v terénu, se kterým se mohou měřit směrová a **spektrální** vlnová data. Vlastní snímač sestávající z kovové tyče nebo drátu pokryté pláštěm z elektrického izolátoru. Obvykle je drát vyroben z mědi a elektrický izolátor z teflonu. Aby byl přenos informací lineární, musí být izolátor v celé délce konstantní tloušťky. Stejně jako u odporového senzoru by měl být použit nějaký mechanismus pro napínání drátu. Vnitřní drát je jednou z elektrod kondenzátoru. Druhá elektroda může být buďto druhý neizolovaný drát, umístěný v blízkosti prvního, nebo to může být samotná voda, která je

závislá na elektrickém potenciálu nádrže. Ve druhém případě je kapacita X mezi vnitřní elektrodou a vodou dána vztahem:

$$C = Kh \quad (4.1)$$

kde K je konstanta, která zahrnuje průměr drátu, elektrický izolátor a permitivita dielektrika, vyjadřující míru odporu při vytváření elektrického pole v určitém přenosovém médiu a h je ponořená hloubka senzoru. Kapacita je tedy úměrná hladině vody.

Některé elektronické obvody, které jsou vhodné pro měření kapacitní impedance, se používají k převodu změn kapacity na napětí. Výstupní napětí reprezentuje výšku vody. Obecně se pro buzení senzorů používají signály v rozsahu radiových frekvencí. Kapacitní snímač díky buzení průměrně měří úroveň na určené oblasti drátu nebo tyče. Velikost této oblasti integrujícího



povrchu, a tedy prostorového průměrování není určen ve specifikacích výrobců. Teoreticky velikost této oblasti závisí na prostorovém rozložení elektromagnetického pole v reálném distribuovaném kondenzátoru. Pro dosažení vysokých hodnot kapacity, které jsou méně náchylné na šum, se izolátor vyrábí obvykle tenký. Při takovéto tloušťce je izolátor náchylný na poškození.

Dynamická reakce vln může být také omezena vodním meniskem na sondě na rozhraní voda-vzduch. Když voda padá kolem zařízení, na povrchu sondy vzniká fyzikální jev nazvaný zvlhčení sondy, který může prodlužovat délku než samotný meniskus. Toto fyzické chování vytváří nízkopřechodový filtr vlny. Zvlhčování je fenomén, který vyplývá z působení soudržnosti

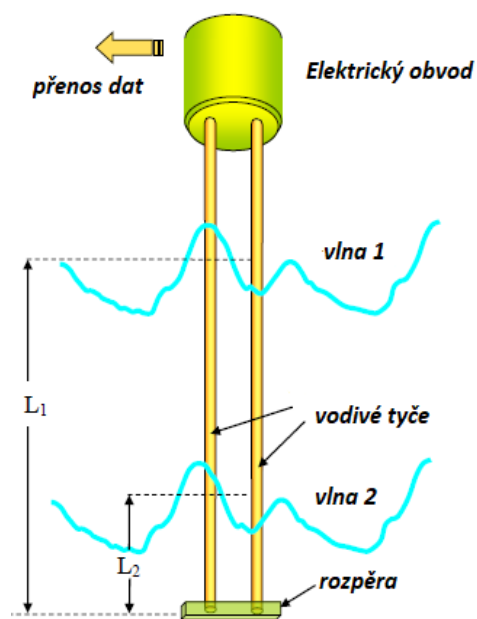
Obr. 23 Kapacitní snímač [3]

a adhezní síly působící na molekuly kapaliny v blízkosti pevného povrchu. Soudržné síly jsou vyvíjeny molekulami v kapalině, zatím co adhezní síly jsou vyvíjeny molekulami pevného povrchu. Vzhledem k tomu, že kapaliny nemohou přenášet smykové napětí, výsledná síla mezi soudržnými a adhezivními silami musí být normální vůči povrchu kapaliny v místě styku s pevným povrchem. Úhel, který dotyková čára svírá s povrchem kapaliny v místě styku s pevným povrchem se nazývá kontaktní úhel. Kontaktní úhel je malý a říká se, že kapalina vlhčí povrch, jsou-li adhezní síly větší než kohezní. Naopak, je-li kontaktní úhel velký, kapalina nezatahuje povrch. Malé množství příměsí, jako např. zvlhčovačla, detergenty a hydroizolační činidla, mohou způsobit velké rozdíly v kontaktním úhlu. Pro správné výsledky by mělo měření probíhat za konstantní citlivosti a konstantní teploty. [1]

4.11 ODPOROVÝ (VODIVÝ) SNÍMAČ

Odporový (vodivý) snímač slouží k měření vln na hydraulických modelech a nádržích, se kterým se mohou měřit směrová a **spektrální** vlnová data. Snímač hladiny je sestaven ze dvou vertikálních vodivých tyčí nebo drátů, obecně vyrobené z nerezové oceli. Snímač má hlavu obsahující elektronické obvody a zahrnuje přenosovou linku na centrální stanici, která je odpovědná za získání signálu z několika senzorů.

Tyče jsou ponořeny v určité hloubce a jsou zajištěny rozpěrou na spodním konci, která zajišťuje tyče v konstantní vzdálenosti a zajišťuje konstantní geometrii. Elektrický obvod měří odpor tyčí a vodu. Protože odpor tyčí a konstanta jsou nízké, tak změna odporu jako „zaznamenaná“ je způsobená okruhem v důsledku změny výšky vody. Naměřený vodní elektrický odpor je dán vztahem:



$$L = \frac{C}{L\sigma} \quad (4.2)$$

kde L je délka ponoření tyčí, σ je vodivost vody a C je konstanta, která závisí na průměru a vzdálenosti mezi tyčemi. Tato rovnice platí od určité vzdálenosti od spodního konce snímače 5 až 10 % délky prutů. Bližší k dolnímu konci vztah mezi odporem a výškou vody již není lineární.

Obr. 24 Odporový snímač na měření vln [1]

Změna odporu měřená elektronickým obvodem je nepřímo úměrná výšce vody. Když snímač změří hodnotu "vlna 2" (obr. 24), odpor vody "zaznamenaný" elektronickým obvodem je R_2 ; když se hladina vody se zvýší na hodnotu "vlna 1", odpor je R_1 a $R_1 < R_2$. Snížení odporu vzniká, protože když jsou pruty ponořeny přidává se paralelně určitý počáteční odpor R_2 . Hodnota ekvivalentního odporů dvou paralelně zapojených rezistorů je vždy menší než menší z obou odporů. To je důvod proč se odpor snižuje s nárůstem hladiny vody. Naměřený odpor a pak napětí je průměr vlny mezi tyčemi. Když je vrcholová délka vlny vody srovnatelná se vzdáleností mezi tyčemi, snímač funguje jako dolní prostorový senzor pro naměřené vlny. Pokud se senzory používají v nádrži, kde vlny cestují jen jedním směrem, je vhodné minimalizovat prostorové průměrování snímače pouze na jeden směr. Řešením je instalace roviny obsahující tyče paralelně na přední stranu vlny.

Tyto kapacitní senzory také trápí problém menisku a zvlhčování popsané v *kap. 4.10*.

Vzhledem k tomu, že odpor je nepřímo úměrný výšce vlny, a my chceme, aby výstupní napětí bylo přímo úměrné výšce vlny, musí se využít některých jednoduchých elektronických obvodů. Běžně se používají střídavé signály v rozsahu zvukových obvodů. Obecně platí, že u hydraulických modelů se používá čistá voda a vodivost vody tedy může být považována za konstantní při krátkodobých

zkouškách. Změny ve vodivosti σ lze řídit kalibrací před a po každém měřicím cyklu. V některých případech, kde se během zkoušky změní vodivost σ se využívá kompenzačního obvodu, který měří vodivost vody současně s výškou vlny. Kalibrace sond se realizuje zvýšením nebo snížením jejich ponorné hloubky a zároveň měřením jejich výstupního napětí. Kontaminanty ve vodě, například jako olej, mohou mít významný vliv na kalibraci. [1]

4.11.1 SENZOR AMR

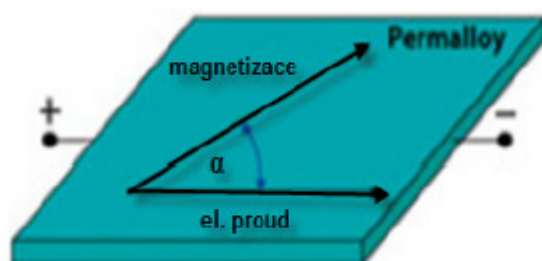
Jako snímače magnetického pole využitelné teoreticky pro měření odporu vody v terénu a na nádrži či laboratorních fyzikálních modelech je možné použití AMR senzorů. Je to jeden z nejvíce rozšířených senzorů magnetického pole. Pro praktické měření ho bylo využito, proto se mu v práci věnuji podrobně.

Principem senzorů AMR je změna elektrického odporu vlivem magnetického pole prostřednictvím tzv. AMR jevu neboli Anizotropická Magnetická Resistence. Anizotropní magnetoresistence se vyskytuje u některých slitin železa a jiných materiálů a toho se využívá u tenkých proužků materiálů slitin, aby vznikl odporový element.

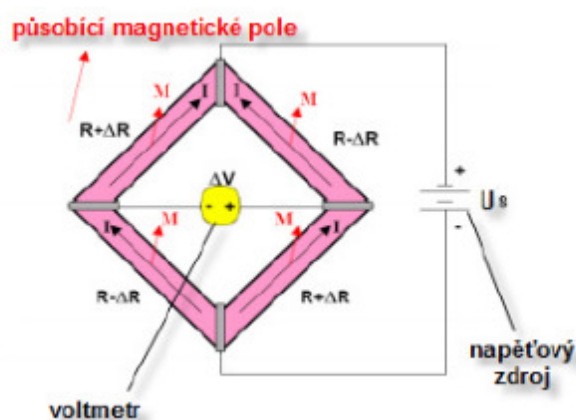
AMR senzory se vyrábějí za použití Permalloy. Permalloy představuje tenkou vrstvu vytvořenou ze slitiny železa a niklu (cca 75 ÷ 80 % niklu) přes kterou teče el. proud.

Permalloy, na který nepůsobí magnetické pole, má svůj klidový odpor. Změna jeho odporu je úměrná druhé mocnině sinu uhlu α (Obr. 25). Tento klidový odpor klesá téměř lineárně, ale jen v rozsahu cca 2-3 % z původní hodnoty odporu. Dále se odpor ani s rostoucí intenzitou magnetického pole nemění. Velmi citlivý AMR jev nereaguje na kolmé magnetické siločáry, ale naopak na podélné horizontální magnetické siločáry a nerozlišuje jejich směr. Nerozlišuje severní a jižní magnetický pól a jeho funkce tedy není závislá na směru magnetického pole.

Reálné provedení AMR senzoru však není jen samotný magneticky citlivý materiál permalloy, ale obvykle se využívá klasického zapojení 4 snímacích odporových elementů do Wheatstonova můstku (Obr.26). [2]



Obr. 25 Schéma funkce Permalloy [2]



Obr. 26 Wheatstonův můstek [2]

5 POPIS ZAŘÍZENÍ SYSTÉMU PRO MĚŘENÍ VLNOVÝCH UDÁLOSTÍ

Pro měření parametrů vln a sestrojení spektrální hustoty a prostorového spektra se využívají systémů uvedených v *kap. 4*. K sestrojení prostorového vlnového spektra je třeba realizovat měření pomocí alespoň 3 vlnoměrů. Většina dostupných vlnoměrů je uzpůsobena pro měření parametrů mořských vln. Svou přesností a citlivostí ($\pm 20 \text{ mm} \pm 1 \%$) nevyhovují požadavku pro měření vln na omezených a relativně malých vodních plochách, kde se výška vln pohybuje do 1 m. Systémy pro měření relativně malých výšek vln na nádržích nejsou na trhu k dispozici. Na trhu jsou ale k dispozici sondy pro měření kapaliny nejčastěji v uzavřených nádržích, využitelné pro měření relativně malých výšek vln, z nichž lze systém měření sestavit. Tyto pásky pracují na principu odporu *kap. 4.11*. Popis stavby testovací konstrukce spolu s měřením a zpracováním dat je popsán v následujících kapitolách.

5.1 PŘEHLED KOMPONENT SYSTÉMU PRO DLOUHODOBÉ ZAZNAMENÁVÁNÍ DAT

Přehled komponent měřicího systému dle [22] je:

Sběr a základní zpracování dat

Raspberry Pi2 – centrální jednotka

Arduino UNO – jednotka sběru dat: výšková úroveň vodní hladiny v nádrži

Milone eTape Liquid Level Sensor – čidla pro kontinuální snímání výškové úrovně vodní hladiny v nádrži (3 ks)

Anemometr – jednotka sběru dat: směr a rychlost větru

WindETH – komunikační prvek pro sběr dat z anemometru

USB kamera – vizuální kontrola systému

Přenos dat

Modem USB – komunikační prvek pro odesílání dat

Anténa pro GSM – komunikační prvek pro odesílání dat

Systém napájení

Solární panel BlueSolar 80Wp

Solární baterie Banner 80Ah

Regulátor napájení BlueSolar MPPT 75/15 – kontrola energie a převodu mezi jednotlivé prvky (sběrnice dat pro solární kontroler)

Převodník napětí 12/5 V – napájení centrální jednotky Raspberry Pi2

5.2 POPIS JEDNOTLIVÝCH PRKŮ MĚŘÍCIHO SYSTÉMU PRO DLOUHODOBÉ ZAZNAMENÁVÁNÍ DAT

5.2.1 RASPBERRY PI2

Základní centrální jednotka, která řídí celý systém, je malý jednodeskový a jednočipový mikropočítač o velikosti kreditní karty. Na tomto počítači je nainstalován operační systém Rasbian GNU/Linux 9 (stretch) běžící na architektuře ARM. Jednotka propojuje jednotlivé komponenty měřicího systému a zajišťuje jejich společnou synchronizaci. Výsledná data jsou poté, v textovém souboru, pro provoz ukládána a spravována na paměťové kartě Raspberry Pi2 (32 GB) a jednou denně odeslána na internet. [22]



Obr. 27 Centrální jednotka Raspberry Pi2 [22]

5.2.2 ARDUINO UNO

Arduino je jednodeskový počítač založený na mikrokontrolerech ATmega od firmy Atmel. Jednotka je určena pro čtení hodnot z odporových čidel v definované frekvenci na základě programového kódu, založeného na jazyku C++. Arduino je v systému odpovědné za sběr dat ze snímačů vodní hladiny v definované frekvenci. Pro detailní zachycení tvaru postupujících vln byla zvolena frekvence zápisu dat 10 Hz (= perioda 100 ms). První řádek datového záznamu obsahuje časovou značku a hodnoty odporu ze tří čidel. V dalších fázích zpracování dat budou hodnoty odporu přepočteny dle kalibrační rovnice na úroveň zatopení čidel v cm, respektive na absolutní hodnotu nadmořské výšky. [22]

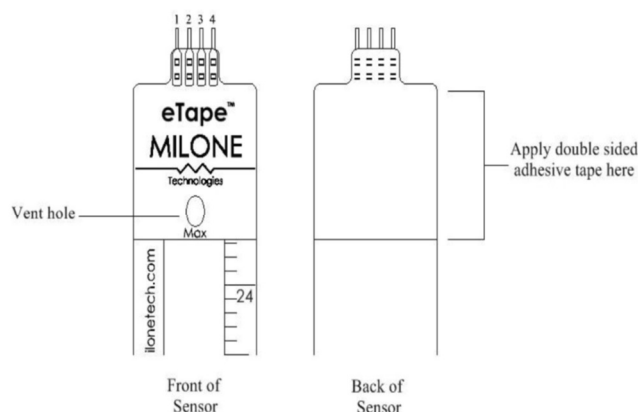


Obr. 28 Řídící jednotka sběru dat kolísání vodní hladiny Arduino UNO Rev3 [22]

5.2.3 MILONE ETAPE LIQUID LEVEL SENSOR

Pro měření změn hladiny bylo použito snímače Milone eTape Liquid Level Sensor od firmy Milone Technologies, Inc. Páska eTape je pevný, kontinuální (víceúrovňový) snímač pro měření úrovně hladiny vody. Snímač funguje tak, že jeho povrch je ve vodě stlačen hydrostatickým tlakem kapaliny, ve které je ponořený, což vede ke změně odporu. Tento odpor odpovídá vzdálenosti od vrcholu senzoru po povrch kapaliny. Senzor eTape poskytuje opačný odporový výstup úměrný úrovni kapaliny tzn. čím nižší je hladina kapaliny, tím vyšší je výstupní odpor, a naopak čím vyšší je hladina kapaliny, tím nižší je odpor. [20]

Délka čidel musí být taková, aby nedošlo k jejich úplnému zatopení, což by mělo za následek výpadek měření. Vzhledem k předběžným odhadům parametrů vln pomocí ČSN 7502 55 nacházející se v kap. 9.3.1 se rozhodlo pro výrobu čidel v délce 2,5 m, což je vzhledem k výše uvedeným skutečnostem dostatečné. Proti mechanickému poškození budou čidla umístěna uvnitř perforovaných plastových trubek Ø 27 mm. [22]



Obr. 29 Odporové čidlo [20]

Obr. 30 Detail části zapojení odporového čidla [22]

5.2.4 ANEMOMETR WINDETH

Anemometr WindETH je poloprofesionální přístroj pro měření rychlosti a směru větru s možností přímého přenosu dat do sítě Ethernet. Data měření jsou na interním webovém rozhraní WindETH nebo prostřednictvím různých formátů (HTTP GET, XML, Spinel atd). Tyto data mohou být zpracovávány automaticky nebo obsluhováno personálem.

Při překročení mezí WindETH upozorní obsluhu e-mailem – v tomto případě je využito čtení XML.

WindETH obsahuje senzor a oddělenou elektroniku, která se připojuje k Ethernetu a k napájení – v tomto případě fotovoltaika. Anemometr je přímo propojen s centrální jednotkou Raspberry Pi2 – tím je zajištěno připojení k Ethernetu. [22]



Obr. 31 Anemometr WindETH [22]

5.2.5 USB KAMERA

Vizuální kontrola systému je možná pomocí webkamery s USB.

V tomto případě je využito webkamery s HD rozlišením 1280 x 720 bodů, rychlost snímání až 30 obrázků/vteřinu, fotografie 3,7 Mpx, rozhraní USB 2.0, délka kabelu 1,5 m. [22]

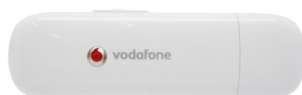


Obr. 32 USB webkamera s HD rozlišením [20]

5.2.6 MODEM USB

Modem USB slouží pro připojení řídicí jednotky k síti Ethernet pomocí připojení 3G/LTE. Modem USB je nastaven tak, že se podle profilu automaticky po restartování zapne. Při výpadku napájení se znovu nastartuje (tato kontrola je prováděna každou hodinu).

V tomto případě je využit modem USB (ID 12d1:1520 Huawei Technologies Co., Ltd. K3765 HSPA) se SIM kartou Vodafone. [22]



Obr. 33 Modem USB Vodafone [20]

5.2.7 SOLÁRNÍ SYSTÉM NAPÁJENÍ

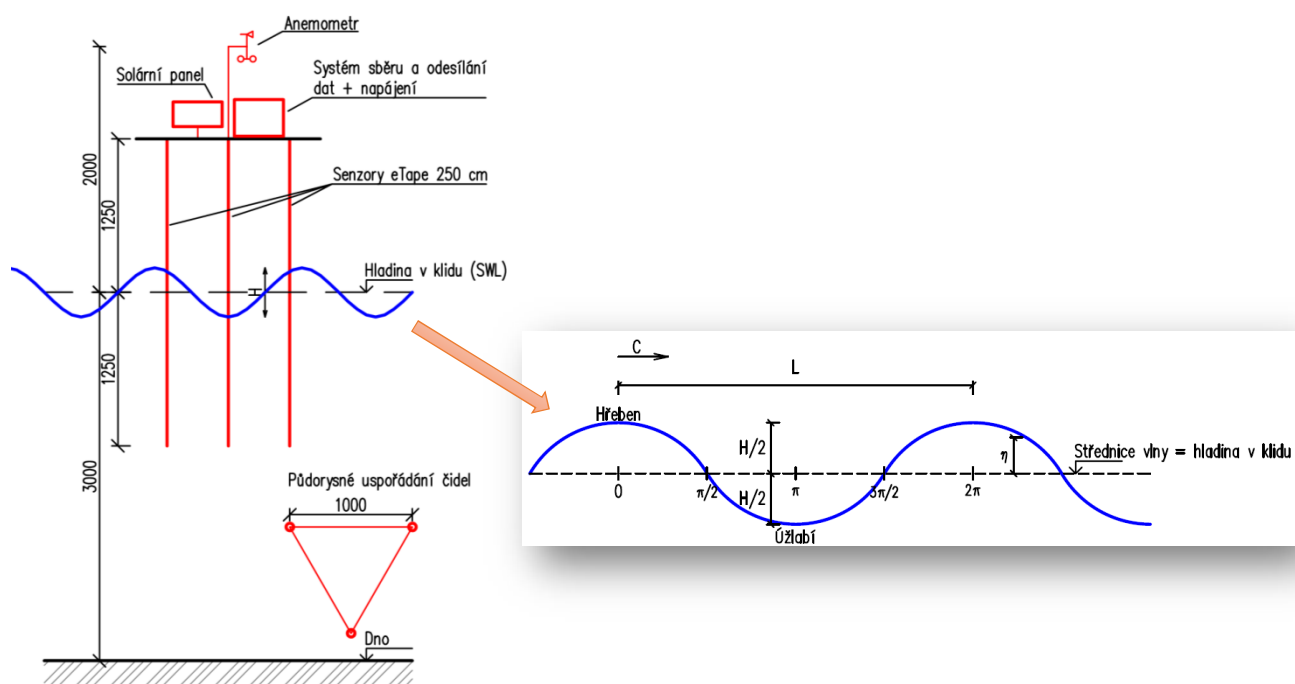
Celý systém je napojen na zdroj elektrické energie, který bude v podobě baterie Banner 80Ah, dobíjená solárním panelem BlueSolar 80 Wp. Součástí napájení je adaptivní nabíjení pro prodloužení životnosti baterie BlueSolar MPPT 75/15. Regulátor neustále sleduje míru nabití baterie a den za dnem postupně zvyšuje úroveň napětí, při které dojde k odpojení zátěže až do stavu, kdy je dosaženo plného nabití baterie. Pro účely napájení centrální jednotky Raspberry Pi2 je zabudován převodník napětí 12/5 V (Obr. 38) [22]



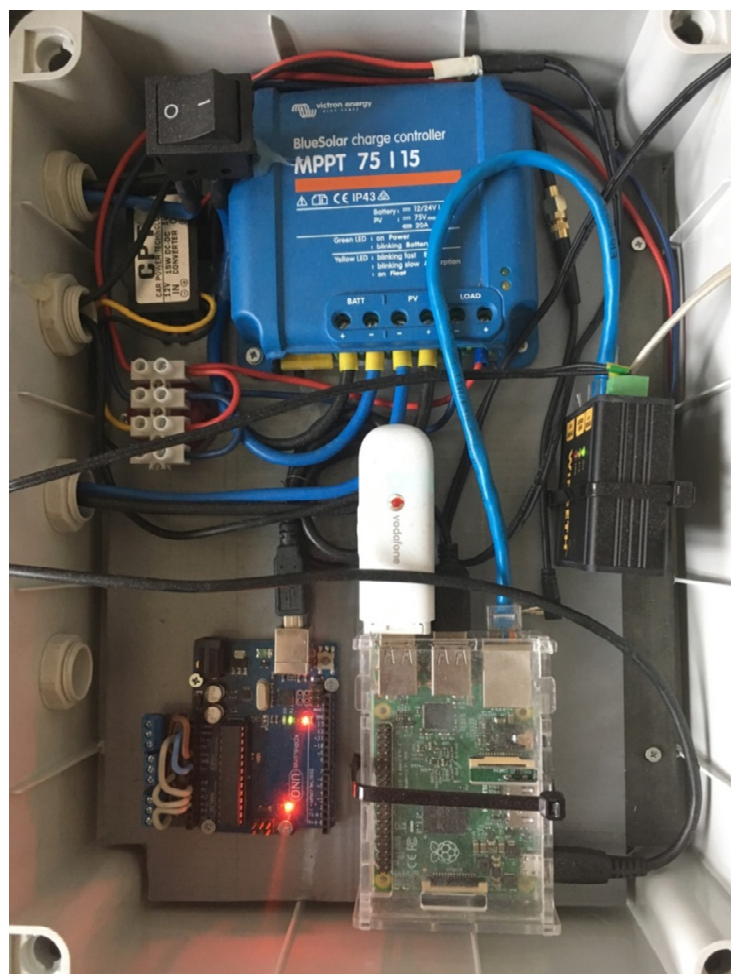
Obr. 34 Solární panel BlueSolar 80Wp [22]



Obr. 35 Baterie Banner 80Ah [20]



Obr. 36 Schéma umístění měřicího systému vůči vodní hladině v nádrži [22]



Obr. 37 Uložení řídicích jednotek měřicího systému v plastovém boxu (stupeň krytí IP 68) [22]

5.2.8 VZDÁLENÝ PŘÍSTUP

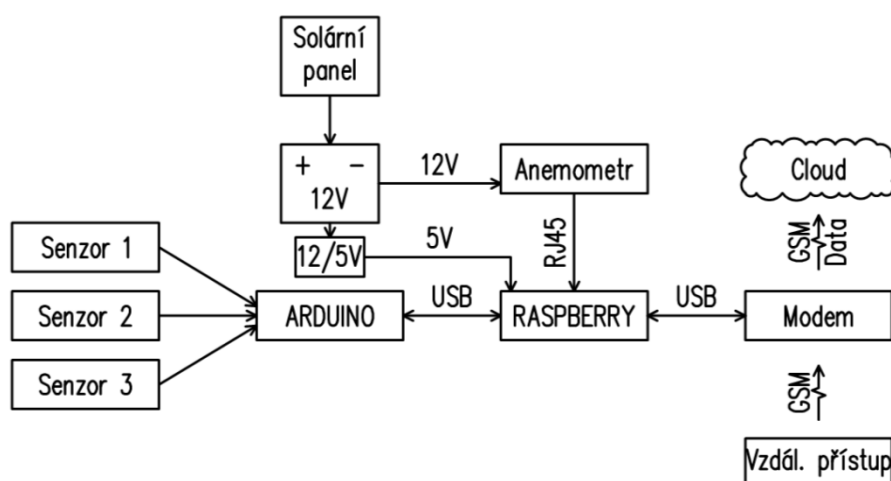
Pro online přístup k naměřeným datům jsou navržena dvě řešení, která jsou na sobě nezávislá. Jde o vzdálený přístup pomocí mobilní sítě. Na řídicí jednotce a na počítači jež bude shromažďovat data z měření musí být nainstalovaný speciální program, který se spáruje pomocí přihlašovacích údajů.

1) VNC CONNECT – primární řešení

VNC je zkratka anglického Virtual Network Computing. Je to program, který umožňuje vzdálenou správu počítače prostřednictvím místní sítě nebo sítě Internet. Program umožňuje vzdálené zobrazení plochy. Přihlášení probíhá pomocí emailu a hesla. Výhodou programu VNC CONNECT je, že je součástí systému (Raspbian) řídicí jednotky Raspebrry PI2. [22]

2) TeamViewer – sekundární řešení

Nástroj pro přístup na vzdálenou plochu. Je to program, který umožňuje vzdálenou správu počítače prostřednictvím místní sítě nebo sítě Internet. Program umožňuje vzdálené zobrazení plochy. Přihlášení probíhá pomocí emailu a hesla. [22]



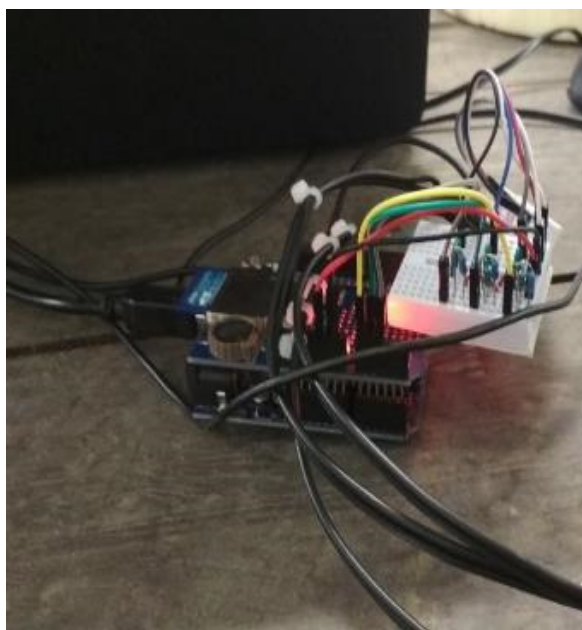
Obr. 38 Blokové schéma měřícího systému sběru a přenosu dat [22]

5.3 POPIS PILOTNÍ MĚŘÍCIHO SYSTÉMU SBĚRU A PŘENOSU DAT

Měřicí zařízení sestávalo ze tří odporových pásek Milone eTape Liquid Sensor délky 80 cm přidělaných k hliníkovým úhelníkům bránícím mechanickému poškození sensorů. Rozmístění čidel bylo do rovnostranného trojúhelníku s délkou strany 53 cm. Odporové pásky byly napojeny na snímač signálu Arduino UNO, u kterého bylo zapotřebí propojení s přenosným počítačem, který data zaznamenával a zpracovával do textového souboru. (Obr.39).



Obr. 39 Blokové schéma pilotního měřicího systému sběru a přenosu dat [22]



Obr. 40 Zapojení snímačů pro sběr dat do centrální jednotky



Obr. 41 Konstrukce měřicího zařízení



Obr. 42 Sběr dat z měření v laboratoři

6 PILOTNÍ TEST MĚŘÍCIHO ZAŘÍZENÍ V LABORATOŘI A NA NÁDRŽI V BRNĚ

6.1 PILOTNÍ MĚŘENÍ V LABORATOŘI LVV FAST VUT

První test měřícího zařízení byl proveden dne 9.7.2018 v laboratoři LVV FAST VUT v Brně v budově F. Pro vlastní měření vln byl osazen systém se třemi odporovými páskami, který je popsán v předešlé kapitole. Data byla zaznamenávána do připojeného počítače se zápisem dat do textového souboru. Tato data měla být následně zpracována v programu MATLAB se souborem nástrojů WAFO sloužící pro statistickou analýzu a simulaci náhodných vln. Toto měření bylo důležité, jelikož došlo k první kalibraci měřícího zařízení, bez které by systém nemohl správně fungovat a měřit tak výšky vln.

Měřící zařízení bylo osazeno v laboratorní nádrži (Obr. 44). Vlny byly vytvářeny ručně pomocí plastové sněhové lopaty a polystyrenové desky položené na hladině vody (Obr.43).



Obr. 43 Generování vln v laboratoři



Obr. 44 Test měřícího zařízení v laboratoři

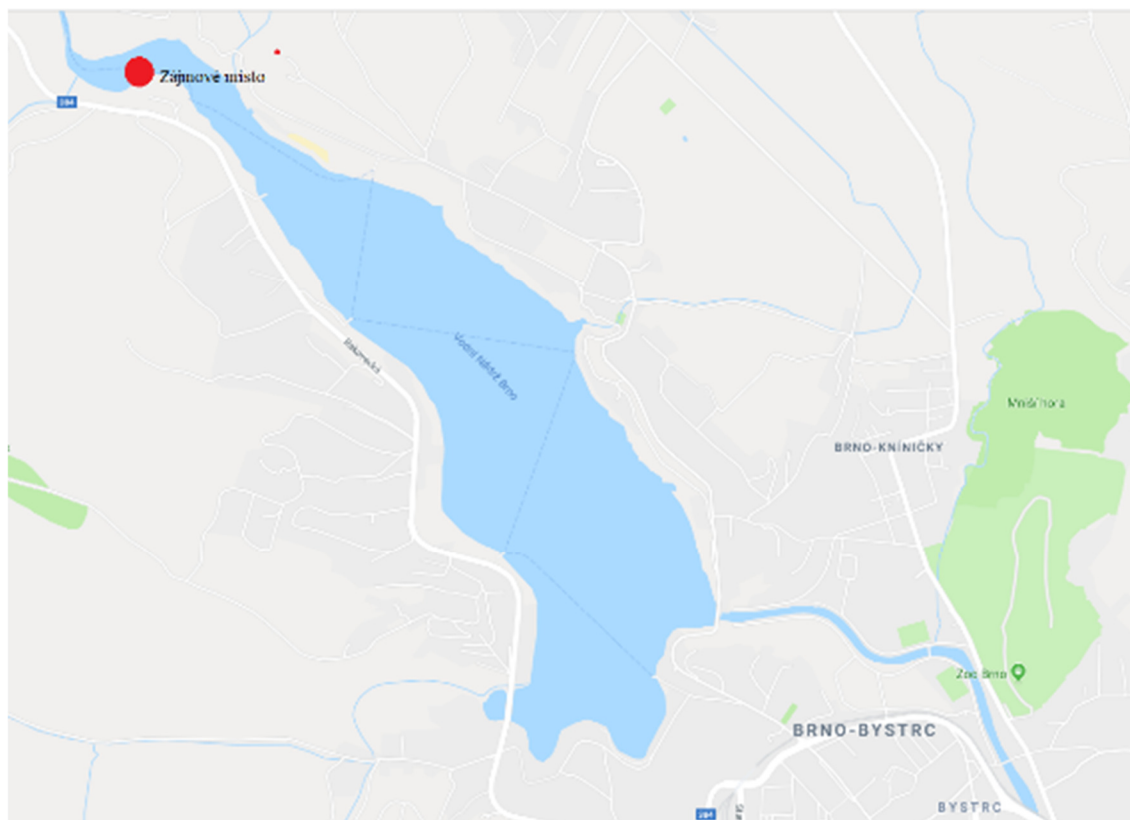
Z tohoto měření v laboratoři bohužel nebyla zachována data, jelikož se jednalo o první zkoušku a kalibraci, a tak nebylo možné vyhodnotit výsledky.

6.2 MĚŘENÍ NA VODNÍ NÁDRŽI BRNO

Druhý test měřícího zařízení byl proveden ve stejný den jako pilotní měření na Vodní nádrži v Brně. Pro vlastní měření vln byl osazen systém se třemi odporovými páskami, který je popsán v předešlé kapitole. Data byla zaznamenávána do připojeného počítače se zápisem dat do textového souboru. Tato data byla následně zpracována v programu MATLAB se souborem nástrojů WAFO sloužící pro statistickou analýzu a simulaci náhodných vln.

Měřící zařízení bylo osazeno na přehradě v Brně, lokalita Rokle (Obr. 45). Sondy byly umístěny asi 5 m od břehu v dostatečné hloubce a zároveň na co pokud nejvíce rovném podkladu, aby byly sondy ponořeny ve stejné hloubce. Hloubka u sond dosahovala kolem 40 cm. (Obr. 47). Cílem bylo umístění čidel v místě, kde není výrazný vliv odrazu vln od břehu. Lokalita Rokle k tomuto poskytuje

příhodné podmínky. Vlny byly vytvářeny ručně pomocí plastové sněhové lopaty a poté byl zaznamenán vlny od průjezdu lodí (Obr.46 a Obr.48).



Obr. 45 Místo měření na přehradě v Brně [15]



Obr. 46 Generování vln pomocí plastové lopaty na sněh



Obr. 47 Měřící zařízení



Obr. 48 Záznam vln generovaný průjezdem lodí

Zaznamenaná data byla následně vyhodnocena a zapsána do souboru *rokle_results.xlsx*. Z výsledků měření vyplývá, že bylo vytvořeno a následně zaznamenáno několik docela krátkých vlnových událostí generovaných z různých směrů.

Pro další postup je potřeba zopakovat měření v laboratoři a dále navrhnout a vytvořit konstrukci měřáku, aby bylo možné delší měření na uzavřené nádrži pro zachycení delších a větších větrových vlnových událostí. Tato naměřená data zpracovat a následně srovnat s výpočtem výšky vlny dle ČSN 75 0255 a jejich prezentování.

6.3 OPĚTOVNÝ TEST V LABORATOŘI

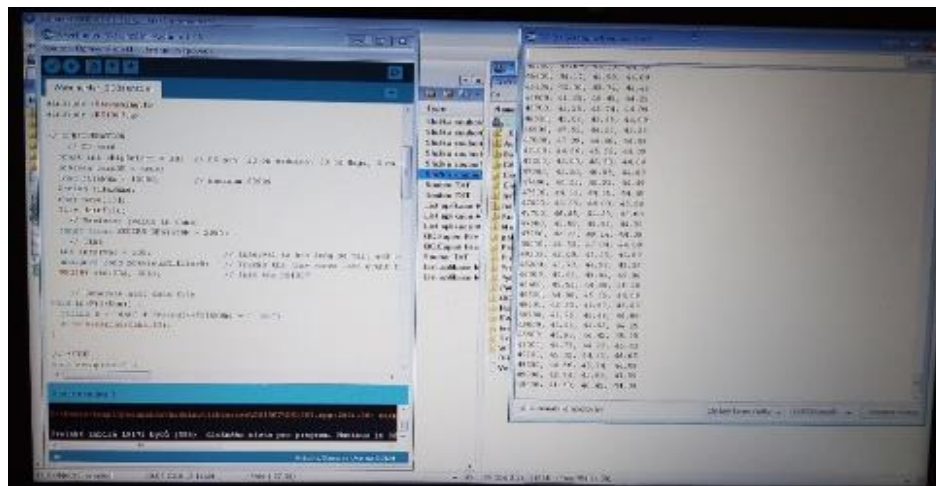
Třetí test měřicího zařízení byl proveden 31.07.2018 jako opravné měření v laboratoři LVV FAST VUT v Brně v budově B. Pro vlastní měření vln byl osazen systém se třemi odporovými páskami, který je popsán v předešlé kapitole (Obr.52). Data byla zaznamenávána do připojeného počítače se zápisem dat do textového souboru (Obr.50). Tato data byla následně zpracována v programu MATLAB se souborem nástrojů WAFO sloužící pro statistickou analýzu a simulaci náhodných vln.

Měřicí zařízení bylo osazeno v laboratorní nádrži (Obr. 49). Vlny byly vytvářeny ručně pomocí polystyrenové desky umístěné na hladinu (Obr.51).



Obr. 49 Místo měření – laboratorní nádrž v budově B

Zaznamenaná data byla následně vyhodnocena a zapsána do souboru *data_graf_2018-07-30_vut_50ms.xlsx*. Postup výpočtu je shrnut v *kap. 7*. Tato kapitola je založena na vysvětlení principu výpočtu v programu MATLAB a jsou zde uváděny příklady pocházející ze zpracování dat tohoto měření. V *kap. 7.4* jsou prezentovány reálné výsledky z tohoto měření a jsou přiloženy v příloze na CD.



Obr. 50 Záznam dat z měření do textového souboru



Obr. 51 Generování vln a osazení přístroje



Obr. 52 Měřicí systém zařízení

7 POSTUP ZPRACOVÁNÍ DAT Z MĚŘICÍHO SYSTÉMU

Zpracování dat probíhalo v programu MATLAB se souborem nástrojů WAFO.

MATLAB® (z anglického MATrix LABoratory) je programovací platforma určená speciálně pro inženýry a vědce. Srdcem MATLABu je jazyk MATLAB, jazyk založený na matici, který umožňuje nejpřirozenější vyjádření výpočetní matematiky. Tento program je uzpůsoben pro operační systémy Windows, Linux i MacOS. Jedná se o systém vhodný pro vědecké a inženýrské výpočty, analýzu, simulaci, modelování dat a k vytváření aplikací. Možnosti MATLABu rozšiřují soubory nástrojů, tzv. toolboxy. Jsou to M-soubory zaměřené na specifické účely (statistika, optimalizace, zpracování signálů apod.) [4]

WAFO slouží pro statistickou analýzu a simulaci náhodných vln. Tento toolbox obsahuje komplexní balík statistických nástrojů pro analýzu náhodných vln i se zahrnutím vlivu lodí. Dále jsou v programu zahrnuty statistické analýzy náhodných procesů, s vysokou přesností, včetně simulace jakéhokoliv spektra Gaussových nebo transformovaných Gaussových vln rozložených do vlnových charakteristik jako je perioda vlny nebo vlnová křivka. [3]

7.1 POPIS M-SOUBORU

Pro zpracování dat bylo vytvořeno několik souborů s M-funkcí.

M-soubor je textový soubor s příponou *.m, který obsahuje posloupnost příkazů a povelů pro výpočet v programu MATLAB. Tento textový soubor lze vytvořit v libovolném textovém editoru, který do dokumentu nepřidává žádné formátovací informace.

Pro zpracování dat byl vytvořen základní skript. Skript je ten nejjednodušší typ M-souboru. Jedná se o pouhý seznam příkazů a povelů MATLABu obsahující import a načtení dat jejich seřazení do matice s výpočtem a výstupem. [4]

Další kapitoly se budou věnovat podrobnému popisu tohoto skriptu.

7.2 SEŘEZENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT (FUNKCE M-SOUBORU)

7.2.1 NAČTENÍ DAT A NASTAVENÍ VÝSTUPU

V první části skriptu je vyvolán příkaz, který načte naměřená data, z textového souboru s příponou *.txt*, do prostředí programu MATLAB a seřadí je do jednotlivých matic. Proměnnými jsou naměřené hloubky h_1 , h_2 a h_3 v čase t . V druhé části je vyvolán požadavek na vytvoření tabulkového souboru s příponou *.xlsx* s tím, že se vypočtené výsledky zapíše do tohoto souboru. [3]

```
%initwafo
%cd 'D:\ownCloud\documents\2018_TACR_vlny\2018_07_31_testovani';
imp=2;
if imp==1 %% Import data from text file.
    filename = 'D:\ownCloud\documents\2018_TACR_vlny\2018_testovani\DAT10007_2018-07-09_Rokle.TXT'; % Initialize variables
    delimiter = {' ',' '}; % Initialize variables.
    startRow = 2; % Initialize variables.
    formatSpec = '%f%f%f%f[^\n\r]'; % For more information, see the TEXTSCAN documentation.
    fileID = fopen(filename,'r'); % Open the text file.
    dataArray = textscan(fileID, formatSpec, 'Delimiter', delimiter, 'MultipleDelimsAsOne', true, 'TextType', 'string', '1');
    fclose(fileID); % Close the text file.
    t = dataArray(:, 1); % Allocate imported array to column variable names
    h1 = dataArray(:, 2); % Allocate imported array to column variable names
    h2 = dataArray(:, 3); % Allocate imported array to column variable names
    h3 = dataArray(:, 4); % Allocate imported array to column variable names
    clearvars filename delimiter startRow formatSpec fileID dataArray ans; % Clear temporary variables
end
if imp==2 %% import data from excel
    filename = 'D:\ownCloud\documents\2018_TACR_vlny\2018_07_31_testovani\data_graf_2018-07-30_vut.xlsx';
    filename = 'data_graf_2018-07-30_vut_50ms.xlsx';
    [~, ~, raw] = xlsread(filename,'data','A4:D10008');
    [~, ~, raw] = xlsread(filename,'data','A4:D20071');
    data = reshape([raw{:}],size(raw)); %% Create output variable
    t = data(:,1); % Allocate imported array to column variable names
    h1 = data(:,2);
    h2 = data(:,3);
    h3 = data(:,4);
    clearvars data raw; % Clear temporary variables
end
```

Obr. 53 Načtení dat a nastavení výstupu v M-souboru

7.2.2 PŘEVEDENÍ A STANDARDIZOVÁNÍ ČASU A HLOUBEK

V druhé části se převede čas t na sekundy a naměřené hloubky h_1 , h_2 a h_3 na metry. Následně se provede časový výsek začínající v čase 200 s a končící s posledním naměřeným časem (celková délka cca 800 s). Časový výsek se přepočítá se začátkem v čase 0 s. Dojde tedy k vynulování časového vektoru t_0 . Dále se standardizují hloubky h_{10} , h_{20} a h_{30} a vytvoří se průměrná hloubka h jakožto průměr ze středních hodnot jednotlivých hloubek, čímž je odstraněn případný posun měřených dat na svislé ose.

Jako vstupní data pro výpočet spektra vln je potřeba vynulovaný časový vektor t_0 a standardizované hloubky h_{10} , h_{20} a h_{30} zapsané do matice $w = [t_0, h_{10}, h_{20}, h_{30}]$. Jako druhá vstupní matice je potřeba zapsat pozici jednotlivých snímacích zařízení $pos = [x, y, z, def, bfs]$. Je to matice $M \times 5$ charakterizující nástroje a pozice měřicího zařízení kde $x(j)$, $y(j)$, $z(j)$ = souřadnice polohy j -tého senzoru ($j = 1: M$), $def(j)$ = identifikační parametr pro j -tou časovou řadu a $bfs(j) = 1$, použití j -té časové řady v konečném odhadu "nejlepšího" frekvenčního spektra. [3]

```
% uprava cas na sekundy, hloubky na metry
t = t/1000; % cas na sekundy
h1 = h1/100;% hloubky na metry
h2 = h2/100;% hloubky na metry
h3 = h3/100;% hloubky na metry

% delit na vlnove udalosti
% nacist udalosti z excel - ted vzit celek
t1=200;%218;%min(t);%1040;%750;%563;%0;% min(t);
t2=max(t);%900;%635;%200;% max(t);

% srovnat data do 0 pro jednotlivé vlnové udalosti
ind=find(t>=t1 & t<=t2);
t0=t(ind)-min(t(ind)); %snulovat casovy vektor
h10=h1(ind)-mean(h1(ind)); % standardizovat hloubky
h20=h2(ind)-mean(h2(ind)); % standardizovat hloubky
h30=h3(ind)-mean(h3(ind)); % standardizovat hloubky
h=1/3*(mean(h1(ind))+mean(h2(ind))+mean(h3(ind))); %hloubka jako prumer ze tri hloubek

w=[t0, h10, h20, h30]; % vstupni data
pos=[0 0 0 1 1;...
      0 0.53 0 1 1;...
      0.2552 0.4473 0 1 1];
```

Obr. 54 Převedení, standardizování času a hloubek v M-souboru

7.3 VÝPOČET (FUNKCE M-SOUBORU)

7.3.1 ODHAD SPEKTRA SMĚROVÝCH VLN

Odhad spektra směrových vln z časových souborů se vyvolá příkazem „*dat2dspec*“ se zadáním jednotlivých proměnných. $S [S, D, Sw, Fcof] = \text{dat2dspec}(w, pos, h, Nfft, Nt, metod, option)$. Kde S je spektrální hustota matice obsahující konstanty; S 2D pole odhadovaného směrového spektra; D odhad funkce rozložení jako funkce θ a ω ; $S(\omega)$ frekvenční spektrum; $Fcof$ Fourierovy koeficienty funkce šíření $D(\omega, \theta)$. Výpočet probíhá ze zadání proměnných na pravé straně. Jednotlivé proměnné jsou w matice dat sloupců se vzorkovanými časy v prvním sloupci a hodnotami v dalších sloupcích; pos matice pozic jednotlivých snímacích zařízení s konstantami; h hloubka vody; $Nfft$ proměnná pro stejné rozlišení frekvence při porovnání zaměřených signálů s nepatrně odlišnými délkami (vyhlazení křivky); Nt počet úhlů (výchozí 101); *metod* *IMLM* iterativní metoda maximální pravděpodobnosti. [3]

```
% nastaveni vypoctu spektra
Nfft=512;
Nth=101;
met='imlm';

% spektrum prostorove
spec=dat2dspec(w,pos,h,Nfft,Nth,met);
figure;
plotspec(spec);
```

Obr. 55 Odhad spektra směrových vln v M-souboru

7.3.2 ODHAD JEDNOSTRANNÉ SPEKTRÁLNÍ HUSTOTY

Odhad jednostranné spektrální hustoty z dat se vyvolá příkazem „*dat2spec*“ se zadáním jednotlivých proměnných. $S = \text{dat2spec}(x, L, g, \text{plotflag}, p, \text{metoda}, \text{dflag}, \text{ftype})$. Pro dílčí spektrum jsou proměnné na pravé straně x matice dat sloupců se vzorkovanými časy v prvním sloupci a hodnotami v dalších sloupcích; L maximální zpoždění funkce okna. (Pokud není zadána hodnota, velikost zpoždění je automaticky nastaveno na autokorelaci menší než 2 standardní odchylky); g transformace za předpokladu, že x je vzorek transformovaný Gaussův proces. (Pokud není zadána hodnota je vzorek Gaussova procesu nastaven automaticky); *plotflag* vyvolává vykreslení křivky; p míra spolehlivosti (0.95 výchozí); metoda „*cov*“ slouží k vyhlazení křivky a vyřešení špiček v S (spektrální hustota), u které je Bf (Hz nebo rad / sec) odděleně od $Bw < Bf$; *dflag* určuje trend provedený na signálu před odhadem (lineární) a *ftype* typ frekvence. [3]

```
% spektra dilci
s1=dat2spec([t0 h10],[],[],0,0.95,'cov','linear','f'); %vyrob spektrum
s2=dat2spec([t0 h20],[],[],0,0.95,'cov','linear','f'); %vyrob spektrum
s3=dat2spec([t0 h30],[],[],0,0.95,'cov','linear','f'); %vyrob spektrum
```

Obr. 56 Odhad jednostranné spektrální hustoty v M-souboru

7.3.3 VYHODNOCENÍ SPEKTRÁLNÍ CHARAKTERISTIKY A JEJICH KOVARIACÍ

Vyhodnocení spektrální charakteristiky a jejich kovariací se vyvolá příkazem „*spec2char*“ se zadáním jednotlivých proměnných $[ch, R, \text{chtext}] = \text{spec2char}(S, \text{fakt}, T)$. Kde ch je vektor spektrálních charakteristik; R matice odpovídající kovariaci danou T a chtext buňka vektorů řetězců popisující prvky ch . Proměnné na pravé straně jsou: S struktura směrové spektrální hustoty s úhlovou frekvencí; *fakt* vektor faktorů celých čísel. Je to řetězec nebo řádek řetězců; T doba záznamu. [3]

Ze spektrálních charakteristik dostaneme sadu rovnic. Nejdůležitější rovnice pro tento výpočet jsou:

$$H_{m0} = 4 * \sqrt{m_0} \quad \text{Významná výška vlny} \quad (7.1)$$

$$T_{m_{10}} = 2 * \pi * m_{10} / m_0 \quad \text{Perioda energie} \quad (7.2)$$

$$T_p = 2 * \pi / \{\omega | \max(S(\omega))\} \quad \text{Doba špičky} \quad (7.3)$$

$$T_{p1} = 2 * \pi * \int S(\omega)^4 d\omega \quad \text{Vrcholová perioda (robustní odhad } T_p) \quad (7.4)$$

7.3.4 VYHODNOCENÍ SPEKTRÁLNÍ SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY

Vyhodnocení spektrální směrové charakteristiky se vyvolá příkazem „*dspec2char*“ se zadáním jednotlivých proměnných $[ch, \text{chtext}] = \text{dspec2char}(S, \text{fakt})$. Kde ch je vektor řetězců jednotlivých buněk popisující prvky ch ; chtext buňka vektorů řetězců popisující prvky ch . Proměnné na pravé straně jsou: S struktura směrové spektrální hustoty s úhlovou frekvencí; *fakt* vektor faktorů celých čísel, řetězec nebo řádek řetězců. [3]

Je zde zaveden předpoklad, že S je směrové spektrum $S(\omega, \theta) = S(\omega) * D(\theta, \omega)$. Pokud je vstupní spektrum vlnového typu, tak jsou data převedena do směrového spektra před výpočty. [3]

Pro mnoho parametrů se používá rozšíření Fourierovy řady $D(\theta, \omega)$:

$$D(\theta(i)) = \{1 + 2 * \sum [a_n * \cos(n * \theta(i)) + b_n * \sin(n * \theta(i))]\} / (2 * \pi) \quad (7.5)$$

Kde $n=1$

$$C_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad a \quad C_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \quad (7.6)$$

Faktory vypočtené při každé frekvenci (parametry závislé na frekvenci):

$$F_{Mdir} = \arctan_2(b_1, a_1) \quad \text{Průměrný směr vln} \quad (7.7)$$

$$F_{Pdir} = \arctan_2(b_2, a_2) / 2 \quad \text{Hlavní směr vlny} \quad (7.8)$$

$$F_{Spr} = \sqrt{2 * (1 - C_1)} \quad \text{Směrové rozložení } M_{dir} \quad (7.9)$$

$$F_{Skew} = -C_2 * \sin(2 * (P_{dir} - M_{dir})) / S_{pr}^3 \quad \text{Kruhové zakreslení } M_{dir} \quad (7.10)$$

$$F_{MSpr} = \arctan_2(\sqrt{(0.5 * b_1^2 * (1 + a_2) - (a_1 * b_1 * b_2) + \dots} \\ 0.5 * a_1^2 * (1 - a_2))), C_1^2 \quad \text{Střední úhel rozložení směru} \quad (7.11)$$

$$F_{S1} = C_1 / (1 - C_1) \quad \text{Distribuční disperzní parametr, S} \quad (7.12)$$

Faktory vypočtené podle maximální frekvence, $f_p = 1/T_p$:

$T_{pMdir} =$ Střední směr vlny na spektrálním vrcholu

$T_{pSpr} =$ Směrové rozložení T_{pMdir}

$T_{pSkew} =$ Zkreslení T_{pMdir}

$W_{dir} = \{\theta(i) | [y, i] = \max(S, S, [\quad], 2)\}$ Hlavní směr vln

```
% spektrální momenty - dílčí spektra a prostorová spektra
schl=spec2char(spec,[1:15]);
%dspecchar
schld=dspec2char(spec,[1:26]);
```

Obr. 57 Vyhodnocení spektrální směrové charakteristiky v M-souboru

7.3.5 VYTAŽENÍ VÝŠEK A STRMOSTI VLN Z NAMĚŘENÝCH A ZPRACOVANÝCH DAT

Extrakce hodnot výšek a strmosti vln z naměřených dat se vyvolá příkazem „*dat2steep*“ se zadáním jednotlivých proměnných $[S, H] = \text{dat2steep}(x_n, \text{rychlost}, \text{metoda})$. Kde S a H je odpovídající strmost a výška vlny. Proměnné na pravé straně jsou: $x_n = [t_i; x_1; x_2 \dots x_M]$, kde t_i = čas a $x_1 x_2 \dots x_M$ jsou M sloupcové vektory; *rychlost* 1,2,3..., Pokud je interpolační rychlost <1 tak se interpolace neprovádí před extrahováním parametru, pokud je interpolační rychlost >1 tak se interpolace provádí před extrahováním parametru; *metoda* „1“ Metoda funguje na principu periody vrcholového stoupání, rychlost (V_{cj}) jako S a vlnová výška H_d jako H . [3]

```
[S, H]=dat2steep(w,0,1);
le=min(size(w));
```

Obr. 58 Vytažení výšek a strmosti vln v M-souboru

7.3.6 VÝPOČET CHARAKTERISTIK VLN

Z vypočtených a extrahovaných dat vypočítá počet vln N . Počet vln je závislý na délce vlny a je extrahován jako minimum ω neboli matice dat sloupců se vzorkovanými časy v prvním sloupci a hodnotami výšek v dalších sloupcích.

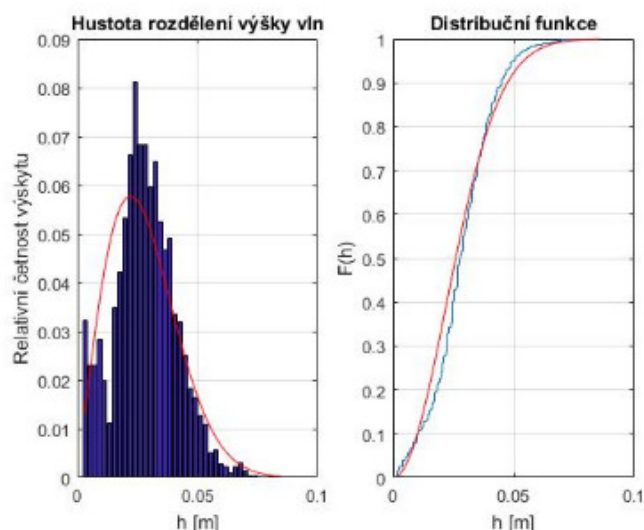
Dále se vypočítá výška vlny s pravděpodobností překročení 1 % a 13 % jako kvantil neboli míra polohy rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny z naměřené výšky. [3]

```
h(H)/(1e-1); %pocet vln
ntile(H,0.99); %vyska vlny s psti prekroceni 1%
antile(H,0.87); %vyska vlny s psti prekroceni 13%
```

Obr. 59 Výpočet charakteristik vln v M-souboru

7.3.7 VYTVOŘENÍ HISTOGRAMU ROZDĚLENÍ VÝŠKY VLN

Pro prezentaci výšek vln byly vytvořeny jeden obrázek (Obr. 60) s dvěma grafy. Reprezentuje histogram výšek vln, a to pomocí rozdělení podle Rayleigh a jejich zakreslením funkcí průběhu – červená čára.



Obr. 60 Histogram rozdělení výšek vln

Na levém grafu je histogram četnosti výskytu vln. Na ose x je výška vlny $h[m]$ a na ose y „relativní četnost výskytu vln“ [%]. Červená čára znázorňuje spektrální hustotu, kterou by měl histogram kopírovat.

Pro sestavení takového grafu byl vytvořen M-soubor. Tento M soubor obsahuje skript.

V první části skriptu se vypočte suma čtverců a vytvoří se odhad rozdělení histogramu. [3]

```
function [Rb CH2b]=histmira(X,b,plotflag,nbin)
%X=H;
%b=bH;

bs=2*(quantile(X,0.75)-quantile(X,0.25))/length(X)^(1/3);

if nbin<1
    nbin=round((max(X)-min(X))/bs);
end
```

Obr. 61 Výpočet sumy čtverců a odhad rozdělení histogramu

Následně se odhadne parametr rozdělení Rayleigh označený jako b . Vypočte se vzorek N nezávislých a identicky distribuovaných Rayleighových náhodných proměnných x_i s parametry σ_i , a tedy provede se odhad maximální nestranné pravděpodobnosti:

$$\hat{\sigma}^2 \approx \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad (7.13)$$

Tyto vypočtená data se následně projeví při vykreslení grafu. Jde o rozdíl v tloušťce a počtu sloupců po ose x . [13]

```
if b<0
    b=(1/(2*length(X))*sum(X.^2))^0.5;
end
[ni xi]=hist(X,nbin);
```

Obr. 62 Odhad parametru rozdělení Rayleigh

V další části se počet výskytu vln, označené jako p_i , přepočte na bezrozměrné číslo od 0 do 1. Poté se přikročí k výpočtu funkce hustoty pravděpodobnosti neboli spektrální hustoty, označenou jako N_i , pro hodnoty X . V našem případě je X výška vlny H . Pro tuto známou hodnotu je spektrální hustota brána jako derivát její kumulativní distribuční funkce. [13]

$$f_X(x; \sigma) = \frac{d}{dx} F_X(x; \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-x^2/(2\sigma^2)} \quad (7.14)$$

Následně se tato vypočtená funkce přepočte na bezrozměrné číslo od 0 do 1.

```
pi=ni/sum(ni);
Ni=(xi/b^2).*exp(-xi.^2/(2*b^2));
Pi=Ni/sum(Ni);
```

Obr. 63 Výpočet spektrální hustoty

Dále se provede test dobré shody, tedy jestli matematická veličina má určité předem dané rozdělení pravděpodobnosti. Využívá se k tomu *Pearsonův chí-kvadrát test*:

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(X_i - Np_i)^2}{Np_i} \quad (7.15)$$

Kde $X_i = n_i$ je skutečný počet rozdělení; $Np_i = \sum n_i \times P_i$ je očekávaná četnost v jednotlivých částech, P_i = pravděpodobnost že veličina nabyde hodnoty z i -té části. [8]

```
ri=(ni-sum(ni)*Pi).^2./(sum(ni)*Pi);
Rb=sum(ri);
```

Obr. 64 Test dobré shody

V neposlední řadě se stanoví inverzní kumulativní distribuční funkce pro určitou distribuci, která se vyvolá příkazem „*icdf*“. Tento příkaz vrací pole hodnot inverzní kumulativní distribuční funkce pro distribuci pravděpodobností jednoho parametru specifikované uživatelem. To znamená že otestujeme chí-kvadrát s 5 stupni volnosti na 5 % hladině významnosti s hodnotou 11,7. [3]

```
CH2b=icdf('chi2',1-0.05,sum(ni)-1);
```

Obr. 65 Stanovení inverzní kumulativní funkce

Poslední část skriptu slouží k vyvolání a vykreslení grafu, popsání os aj.

```
if plotflag==1
    bar(xi,pi);
    hold on
    plot(xi,Pi,'-r');
    grid on
    xlabel('náhodná veličina x')
    ylabel('relativní četnost p')
    hold off
end
end
```

Obr. 66 Vykreslení a úprava grafu

Celý tento skript se nahází v M-souboru s názvem *histmira.m*

Na pravém grafu je distribuční rozdělení funkce. Červená čára znázorňuje funkci rozdělení, kterou by měl vypočtený graf kopírovat. Pro sestrojení takového grafu byl vytvořen M-soubor. Tento M-soubor obsahuje skript. Z velké části obsahuje stejné parametry výpočtu jako v M-souboru *histmira.m* popsaný výše, a proto popíši jen rozdílné části výpočtu. První část odhadů parametrů rozdělení Rayleigh jsou stejné skript se liší hlavně ve vykreslení funkce, kde se využívá importovaného rozdělení v programu MATLAB. Využívá se empirické Kaplan-Meierovy kumulativní distribuční funkce, která se vyvolá příkazem „ $[F, X] = \text{ecdf}(Y)$ “. Tato funkce se vypočítá jako odhad z kumulativní distribuční funkce *cdf*. *Y* je vektor hodnot dat. *F* je vektor hodnot empirické *cdf* vyhodnocené z *X*. V našem případě je *F* skutečný počet rozdělení vln *ni* a *X* výška vlny *H*. [3]

Kulminační distribuční funkce se vypočte jako:

$$F_X(x; \sigma) = 1 - e^{-x^2/(2\sigma^2)} \quad (7.16)$$

A dále je skript stejný jako předešlý.

```
[ni xi]=ecdf(X);
%pi=ni/sum(ni);
Ni=1-exp(-xi.^2/(2*b^2));
%Pi=Ni/sum(Ni);
%ri=(ni-sum(ni)*Pi).^2./(sum(ni)*Pi);
%Rb=sum(ri);
CH2b=0;%icdf('chi2',1-0.05,sum(ni)-1);
if plotflag==1
    ecdf(X);
    hold on
    plot(xi,Ni,'-r');
    grid on
    xlabel('náhodná veličina x')
    ylabel('kumulativní četnost P')
    hold off
end
```

Obr. 67 Distribuční rozdělení funkce

Celý tento skript se nahází v M-souboru s názvem *distmira.m*

Zapojení těchto skriptů a jejich popis části zapojení ve výsledném M-souboru pro zpracování dat je zobrazeno níže (Obr. 68). V této části skriptu je popsáno načtení těchto skriptů a grafická úprava obrázku ve výsledném M-souboru. Přesnější vysvětlení vykreslení ve [4].

```
figure;  
subplot(1,2,1)  
% [nH hH]=hist(H,nbin); %hist(H,sqrt(length(H)));  
% bar(hH,nH/length(H))  
histmira(H,-1,1,0)  
title('Hustota rozdělení výšky vln');  
xlabel('h [m]');  
ylabel('Relativní četnost výskytu');  
grid on;  
subplot(1,2,2)  
distmira(H,-1,1,0)  
%ecdf(H);  
title('Distribuční funkce');  
xlabel('h [m]');  
ylabel('F(h)');  
grid on;
```

Obr. 68 Distribuční rozdělení funkce

Funkčnost vykreslení histogramu rozdělení výšky vln je podmíněno uložením předem popsáných skriptů do stejné složky jako je výsledný M-soubor, aby bylo možné jejich načtení bez další úpravy ve skriptu.

7.3.8 VYVOLÁNÍ VYPOČTENÝCH DAT A JEJICH ULOŽENÍ

V poslední fázi skriptu je napsán příkaz pro vyvolání výsledků ze zpracovaných dat a jejich následné zapsání do výsledné matice. Tato matice se zapíše do .xlsx souboru a vytvoří zde novou záložku „results“ s výsledky. Hlavní výsledky, co nás zajímají je N Počet vln, H_{m0} charakteristická výška vlny, H_{1p} výška vlny s pravděpodobností překročení 1 %, H_{13p} výška vlny s pravděpodobností překročení 13 %, T_{m01} střední perioda vlny, T_{m02} střední perioda procházející 0, T_{m_10} perioda energie, a nakonec směr a disperze energie. Více informací o výpočtu [3]; [4].

```
Hm0=schl(1);  
Tp=schl(6);  
Tm01=schl(2);  
Tm02=schl(3);  
Tm_10=schl(5);  
MWD=schld{16};  
DSD=schld{18};  
Hm0x=Hm0*cos(MWD);  
Hm0y=Hm0*sin(MWD);  
Rs=schl(10);  
M=[t1 t2 N Hm0 Tp Tm01 Tm02 Tm_10 MWD*180/pi DSD*180/pi Hm0x Hm0y Rs H1p H13p length(H)];  
%Mh=['t1' 't2' 'N' 'Hm0' 'Tp' 'Tm01' 'Tm02' 'Tm_10' 'MWD*180/pi' 'DSD*180/pi' 'Hm0x' 'Hm0y' 'Rs' 'H1p' 'H13p' 'length(H)'];  
%xlswrite(filename, Mh, 'results', ['b',int2str(4)]);  
xlswrite(filename, M, 'results', ['b',int2str(5)]);
```

Obr. 69 Vyvolání a zapsání výsledků charakteristik vln v M-souboru

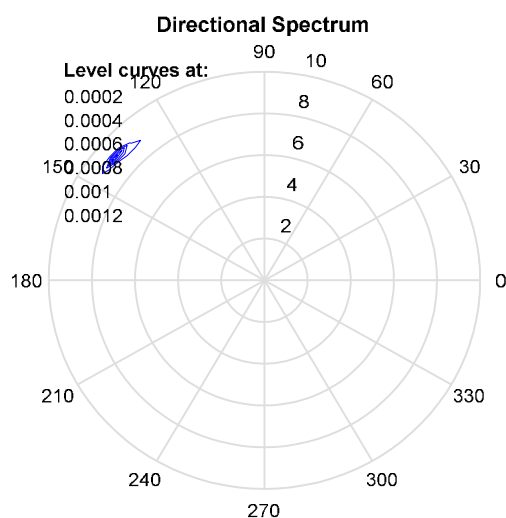
7.4 VÝSTUP Z MATLABU (M-SOUBORU)

Výstup z programu WAFO je zapsán do tabulkového souboru do matice s jednotlivými výsledky a dále jsou vytvořeny grafy, a to jeden graf směrového spektra, tři grafy spektrální hustoty na jednotlivých odporových páskách s_1 , s_2 a s_3 , průběh vln v určitém časovém úseku s označením maxim a minim vln na jednotlivých odporových páskách, rozložení směrového spektra energie vln po kruhové orbitě a histogram hustoty rozdělení výšky vlny a její distribuční funkci rozdělení Rayleigh. Prezentovaná data jsou reálné výsledky z měření ze dne 31.07.2018. Jde o reprezentativní ukázkou výsledků.

Lokalita	laboratoř LVV VUT FAST
Popis	Pilotní měření vln na třech páskách v laboratoři
Soubor dat	DAT10003_2018-07-30_vut.TXT

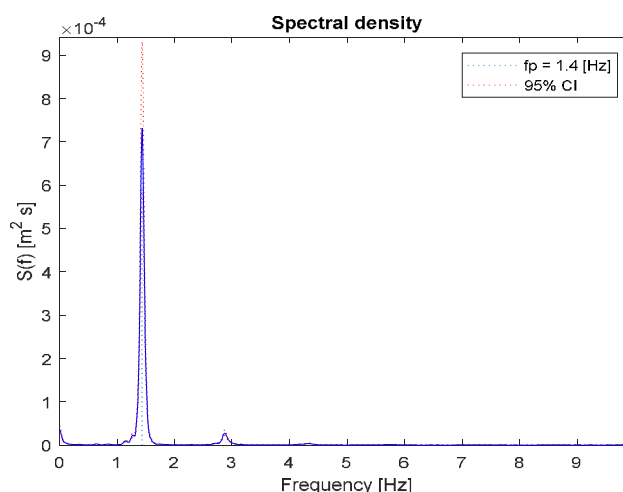
N	1277	-	Počet vln
Length (H)	3830	-	Celkový počet vln na 3 odporových páskách
H_{m0}	0.0455	m	Charakteristická výška vlny
H_{1p}	0.0638	m	Výška vlny s pravděpodobností překročení 1 %
H_{13p}	0.0426	m	Výška vlny s pravděpodobností překročení 13 %
T_p	0.692	s	Vrcholová perioda
T_{m01}	0.579	s	Střední perioda vlny
T_{m02}	0.479	s	Střední perioda procházející nulou
T_{m-10}	0.707	s	Perioda energie
$MWD \cdot 180 / \pi$	139.74	°	Směr vln
$DSD \cdot 180 / \pi$	57.79	°	Disperze směru vln

1. Směrové spektrum energie vln



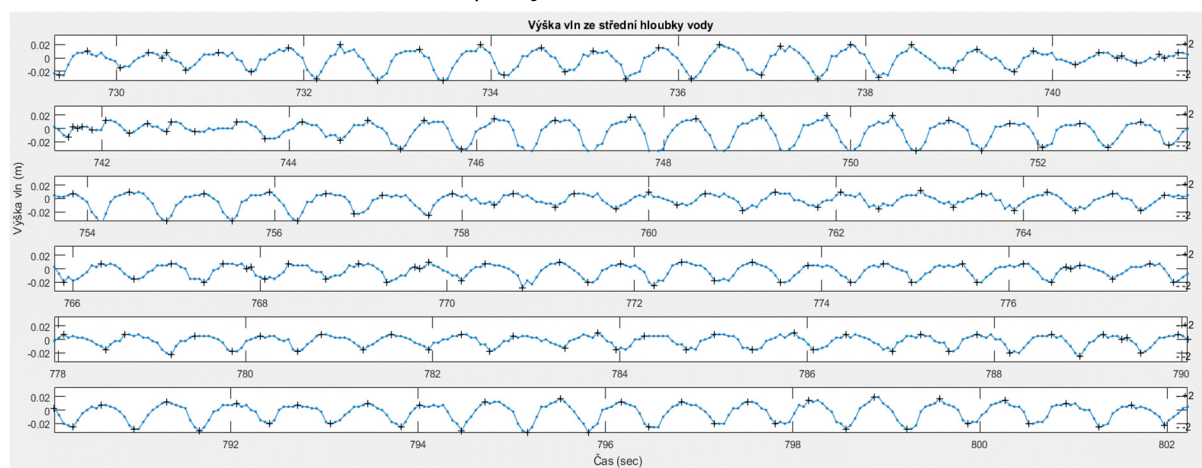
Obr. 70 Směrové spektrum energie vln

2. Spektrální hustota z pásky s_1



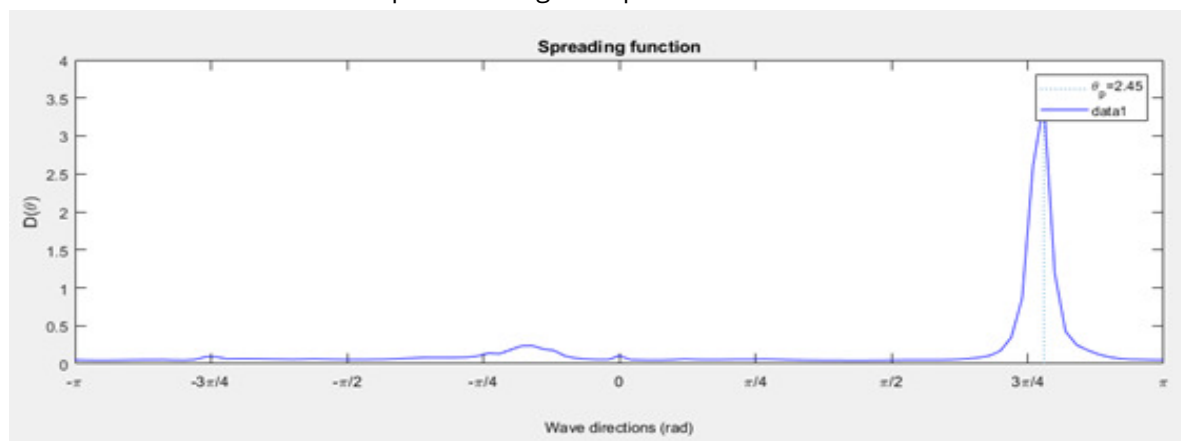
Obr. 71 Spektrální hustota z pásky s_1

3. Průběh vln na konci měření z pásy s_1 – maxima a minima



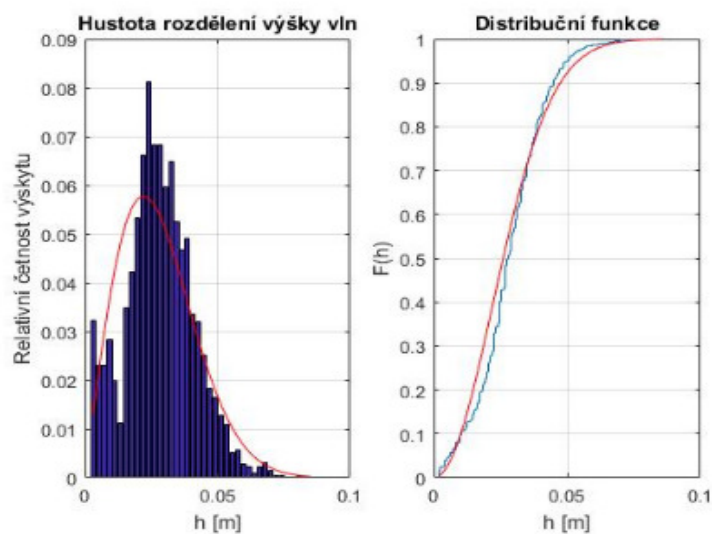
Obr. 72 Průběh vln na konci měření z pásy s_1 – maxima a minima

4. Rozložení směrového spektra energie vln po kruhové orbitě



Obr. 73 Průběh vln na konci měření z pásy s_1 – maxima a minima

5. Histogram hustoty rozdělení výšky vlny a její distribuční funkci rozdělení Rayleigh



Obr. 74 Průběh vln na konci měření z pásy s_1 – maxima a minima

7.5 ZÁVĚR Z PILOTNÍCH MĚŘENÍ

Z pilotního testování měřícího zařízení na principu odporového snímače a následného zpracování dat vyplývá, že zamýšlený způsob měření byl úspěšný. Přístroj se povedlo sestavit a otestovat v laboratoři a na vodní nádrži v Brně. Při měření bylo zjištěno že je třeba správně nastavit orientaci osazení čidel, aby bylo možné správně určit směr šíření vln. Je třeba zjistit závislost mezi vzájemnou osovou vzdáleností. Distance kolem 53 centimetrů, pro délku pásky 80 cm, které bylo využito v laboratoři se jeví jako celkem vhodná.

Data byla správně zaznamenána a následně zpracována, viz předešlá *kapitola 7.4*. Výstup z Matlabu, kde jsou doložena zpracovaná data s výsledky. Pro zpracování a filtrování dat je vytvořen M-soubor, který je kalibrovaný a připravený pro další použití a zpracování dat z měření v delším časovém úseku.

8 IDEOVÝ NÁVRH KONSTRUKCE PRO OSAZENÍ MĚŘÍCIHO ZAŘÍZENÍ

Byly navrženy 4 konstrukce pro osazení měřícího zařízení popsané výše.

Všechny návrhy konstrukce jsou zamýšleny:

- z pozinkované oceli, alternativně ochráněnou nátěrem proti korozi,
- materiál z běžně dostupný na internetu nebo ve stavebninách,
- konstrukce bude obsahovat plošinu umístěnou 1,5 m nad hladinou,
- na konstrukci budou osazena čidla pro měření polohy hladiny (odporové pásky),
- na konstrukci bude osazen anemometr pro měření intenzity a směru větru (*Obr.75*).
- na konstrukci bude osazen solární panel, který zajistí dostatek energie pro chod měřícího systému (*Obr.76*).
- pro osazení a přikotvení konstrukce na dno nádrže se předpokládá využití potápěčských prací (*Obr.77*).



Obr. 75 Anemometr [20]



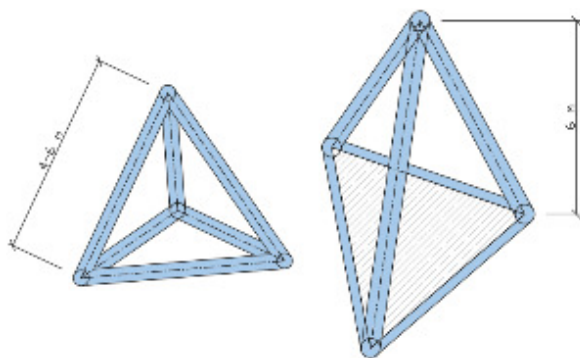
Obr. 76 Solární panel [20]



Obr. 77 Potápěčské práce [20]

8.1 TROJBOKÝ JEHLAN

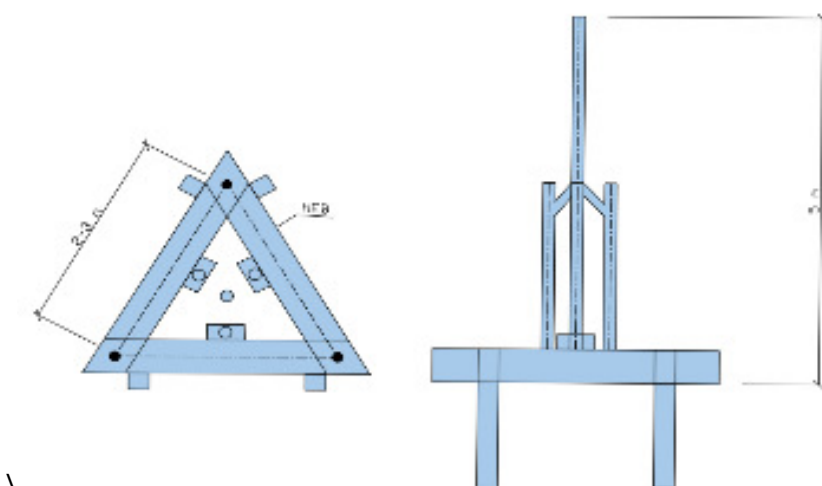
Jedná se o konstrukci svařenou z lešeňových trubek ve tvaru rovnostranného jehlanu s délkou strany 4-6 m a s výškou cca 5 m. Podstava je opatřena betonovým panelem nebo ocelovým plechem, přitížením, proti vyplavání (Obr.78). Na špičku konstrukce se přidělá měřící zařízení a odporové pásky se osadí podél svislých trubek. Nevýhoda použití trojbokého jehlanu že hrozí nerovnoměrné sedání konstrukce a že konstrukce nemusí být ve vlnobití dostatečně stabilní.



Obr. 78 Půdorys a pohled na konstrukci trojboký jehlan

8.2 KONSTRUKCE S PODSTAVOU Z HEB PROFILŮ

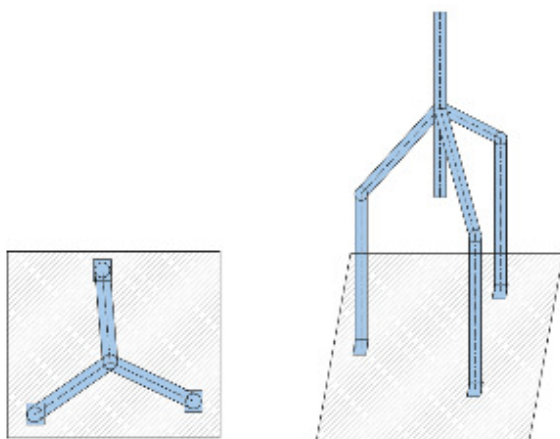
Podstava konstrukce je zamýšlena z HEB profilů, které jsou svařeny do rovnostranného trojúhelníku s délkou strany 2-3 m, opatřené menšími HEB profily délky 2 m, sloužící jako kotvení do dna nádrže. Na tuto konstrukci je namontována konstrukce z lešeňových prvků. (Obr. 79) Na špičku této konstrukce se přidělá solární panel a anemometr a dále se osadí měřící zařízení s odporovými páskami. Vzdálenost pásek od sebe je určena rozchodem trubek vrchní namontované konstrukce. Nevýhodou je pracnost přípravy konstrukce, cena a nutnost vynaložení těžké mechanizace při osazování konstrukce do nádrže.



Obr. 79 Půdorys a pohled na konstrukci s podstavou z HEB profilů

8.3 KONSTRUKCE S PODSTAVOU Z BETONOVÉ DESKY

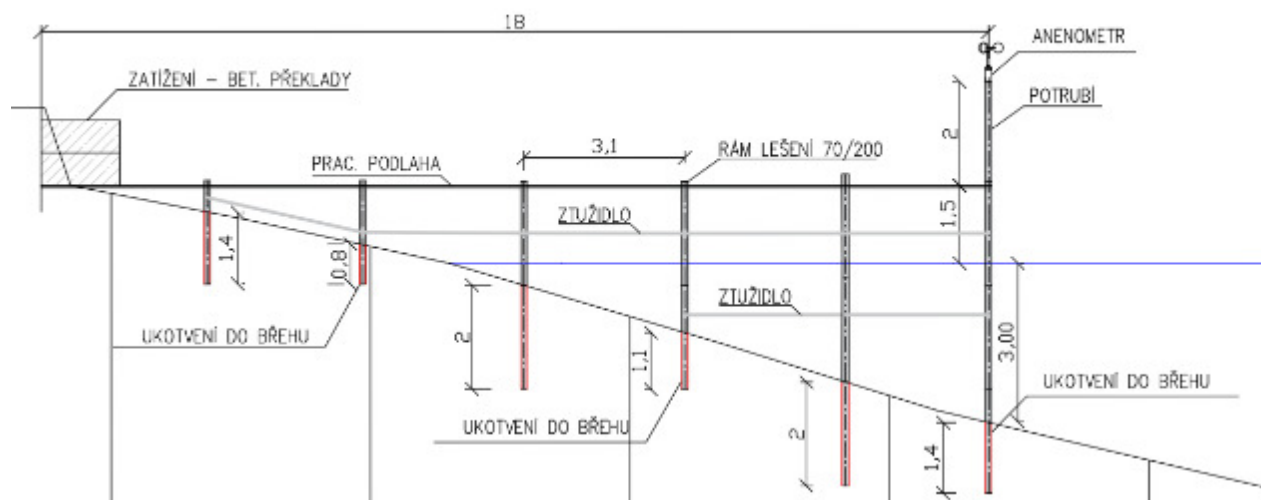
Podstava konstrukce je zamýšlena z betonové desky, nejlépe ze silničního panelu zabraňující vyplavání konstrukce. Na tuto desku je namontována konstrukce z lešeňových prvků (*Obr.80*). Vrchní konstrukce z trubek je stejného tvaru jako konstrukce popsané výše v *kap. 8.2*. Nevýhoda použití betonové desky hrozí nerovnoměrné sedání a sjíždění konstrukce do nádrže. Nevýhodou je rovněž potřeba využití těžké mechanizace při osazování konstrukce.



Obr. 80 Půdorys a pohled na konstrukci s podstavou z betonové desky

8.4 SYSTÉMOVÉ LEŠENÍ - NÁVRH S KONKRÉTNÍ APLIKACÍ V TĚŽEBNÍ LAGUNĚ PÍSKOVNY V HULÍNĚ

Konstrukce sestavená z lešeňových prvků, které jsou běžně dostupné na internetu, např. www.leseni.cz. Konstrukce ze systémového lešení se stává z jednotlivých lešeňových prvků spojených v konstrukci lešení sestupující postupně s břehem. Kotvení konstrukce je realizováno pomocí lešeňového rámu pro jednu fošnu 70/200, který se zabere 2 m do dna nádrže. K tomuto účelu se využije potápěčských prací. Na takto zakotvené první rámy se osadí další rámy lešení, které budou od sebe v osové vzdálenosti 3 m v určitých počtech rámců (*Obr.81*). Tyto rámy se mezi sebou vyztuží příčnými ztužidly zajišťující tuhost konstrukce. Na tyto rámy se osadí pochůzná podlaha, která bude 1,5 m nad hladinou vody. Vzdálenost konstrukce je asi 15-18 m od hrany břehu, tak abychom měli odporové pásy ponořené v nádrži ve hloubce 3 m. Na konci je konstrukce zatížena betonovými panely silničními, případně betonovými překlady, v takovém počtu, aby splnily požadavek na zatížení jako silniční panel. Betonové překlady se zdají jako lepší varianta, jelikož pro jejich manipulaci není zapotřebí těžké techniky jako v případě použití silničních panelů.



Obr. 81 Konstrukce z lešňových prvků

Pro tuto konstrukci je potřeba:

- 1) Rám lešení 70/200– cena za 1 ks: 1233 Kč
Potřeba: 12Ks – 14 796 Kč



Obr. 82 Rám lešení 70/200 [18]

- 2) Pracovní podlaha ocelová 3 m – cena za 1 ks: 1292 Kč
Potřeba: 6Ks – 7 752 Kč



Obr. 83 Pracovní podlaha ocelová 3 m [18]

- 3) Úhlopříčné ztužení délky 3 m– cena za 1 ks: 569 Kč



Obr. 84 Úhlopříčné stužidlo délky 3 m [18]

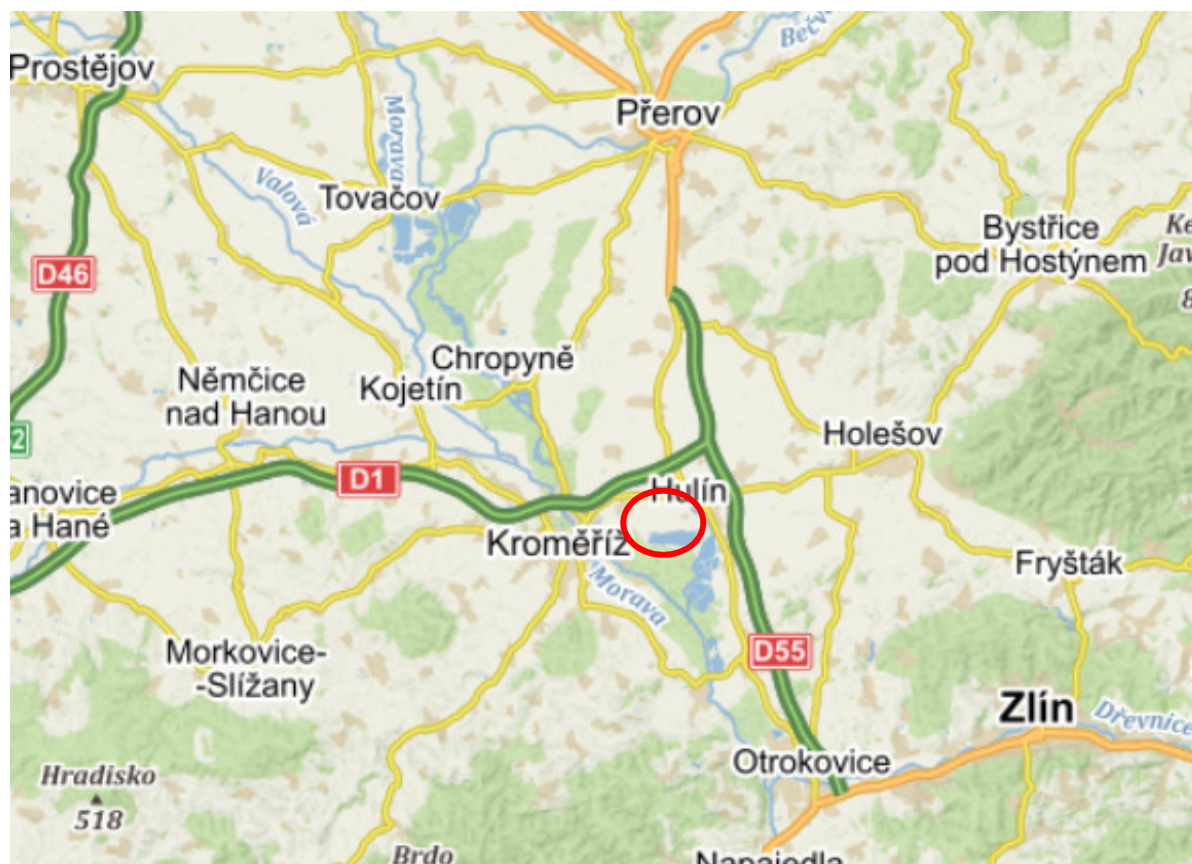
Potřeba: 14 Ks – 7 996 Kč

- 4) Potrubí na zabradlí (22 ks), spoje a další materiál – cca 10 000 Kč
- 5) Anenometr– cena za 1 ks: cca 2000 Kč
- 6) Solární panel cena za 1 ks: cca 10 000 Kč

Výsledná cena konstrukce z lešení bez prací je 52 544 Kč

9 NÁDRŽ HULÍN

Pro dlouhodobé zaznamenávání větrových oscilačních vln je nejvhodnější uzavřená nádrž, kde není významné kolísání hladiny a vlny vznikají, pokud možno pouze větrem. Pro zvolené účely byla domluvena spolupráce se štěrkopískovnou Hulín. Nádrž, na které bude probíhat dlouhodobé měření vln se nachází na Moravě mezi městy Hulín a Kroměříž, přibližně 17 km jižně od Přerova a cca 25 km severozápadně od Zlína (Obr.85).



Obr. 85 Umístění nádrže [16]

9.1 ZÁKLADNÍ ÚDAJE O ÚZEMÍ

9.1.1 HYDROGEOLOGICKÉ A GEOMORFOLOGICKÉ PODMÍNKY

Geomorfologická klasifikace:

Provincie: Západní Karpaty

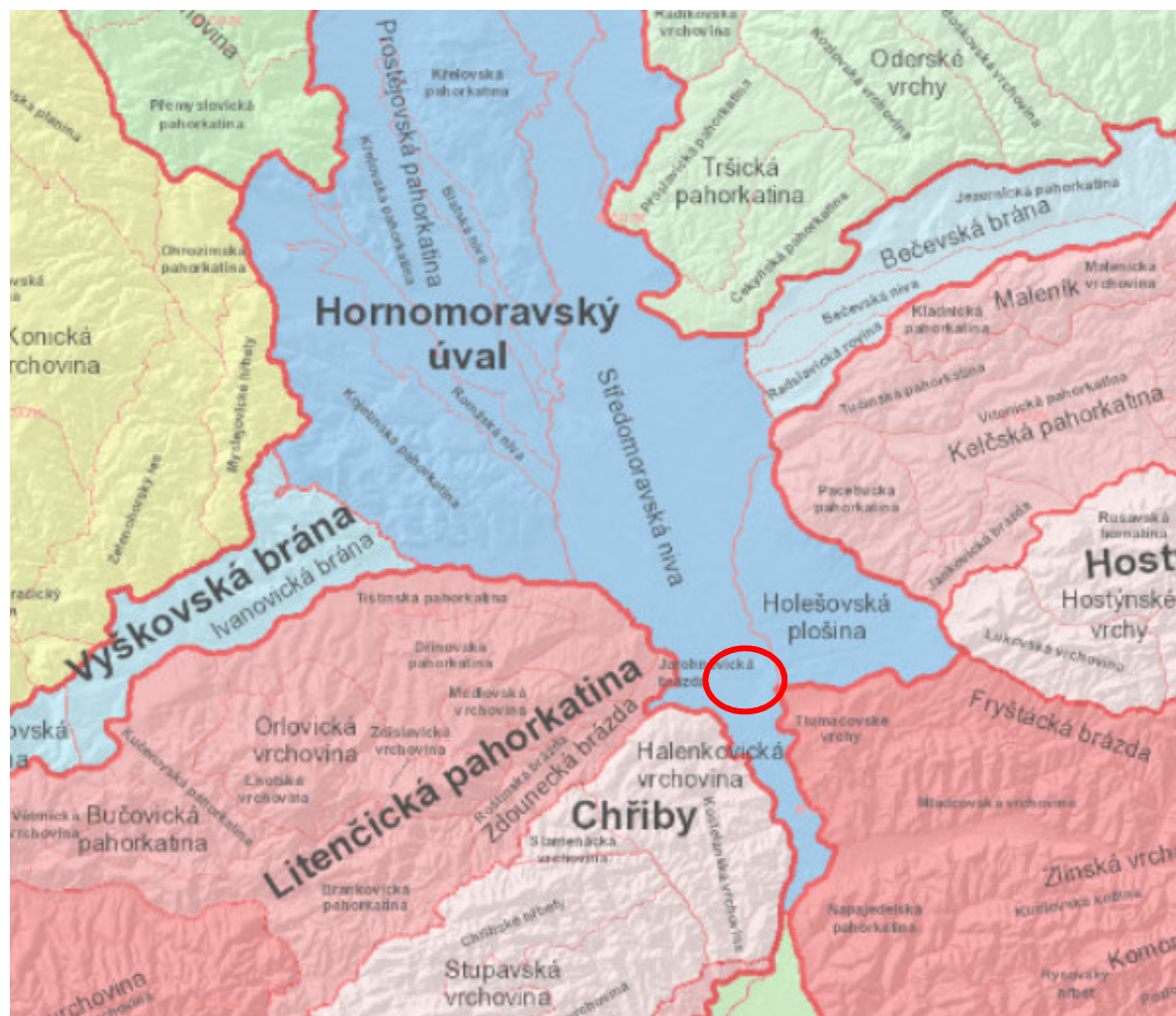
Subprovincie: Vněkarpatské sníženiny

Oblasti: Západní Vněkarpatská sníženina

Celek: Hornomoravský úval

Podcelek: Středomoravská niva

Okrsku: Jarohněvická brázda



Obr. 86 Geomorfologická mapa [15]

Z geologického hlediska je území tvořeno převážně nivními sedimenty. Lokalita se nachází v údolí nivy řeky Moravy. V dřívějších dobách docházelo k častým rozlivům řeky do těchto míst. V lokalitě se nachází hlavně štěrky a písky. Tyto vrstvy tvoří hlavní svrchní terasy akumulace. Území je převážně bezlesé a rovinaté.

Hodnocené území náleží hydrogeologickému rájónu 16 - Kvartérní sedimenty v povodí řeky Moravy. Hydrogeologický kolektor je složen z průlinově propustných hrubozrnných písků a štěrků nejspíše kvartérního stáří. U písčitých štěrků a písků lze říci že jsou silně propustné až mírně propustné s hydraulickou vodivostí $k = 1 \cdot 10^{-5}$ až $1 \cdot 10^{-4}$ m/s a průtočností $T = 1 \cdot 10^{-3}$ až $9 \cdot 10^{-3}$ m/s. [11]

Nádrž šterkopískovny u Hulína se nachází v proudu podzemní vody protékající jihozápadním směrem od výše položených infiltračních oblastí v liniích Němčice – Rymice a Kurovice – Ludslavice – Třebetice k řece Moravě. Zhruba sledují směr toku Rusavy a na severu území směr toku Moštěnky. Přírodní proud podzemní vody má sklon 0,001 až 0,002 a přibližně západní až jihozápadní směr. [11]

9.1.2 KLIMATICKÉ PODMÍNKY

Oblast náleží dle klimatických podmínek do oblasti T2 – teplá oblast.

Tato oblast je charakteristická dlouhými, teplými a poměrně suchými léty. Jaro a podzim jsou charakterizovány jako krátké a teplé období. Zima je charakterizována suchá s krátkým trváním sněhové pokrývky (40–50 dnů). [12]

Tab. 1 Tabulka klimatických podmínek oblasti T2 [12]

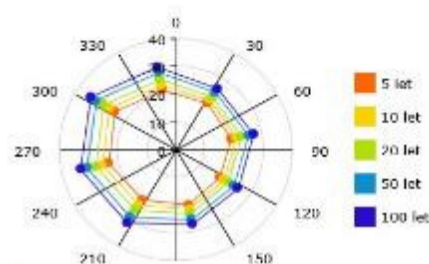
Počet letních dnů	50 – 60
Počet dní s průměrnou teplotou nad 10°C a více	160 – 170
Počet mrazových dní	100 – 110
Počet ledových dní	30 – 40
Průměrná teplota ledna	- 2 – - 3
Průměrná teplota dubna	8 – 9
Průměrná teplota července	18 – 19
Průměrná teplota října	7 – 9
Průměrný počet dní se srážkami 1 mm a více	90 – 100
Srážkový úhrn za vegetační období	350 – 400
Srážkový úhrn v zimním období	200 – 300
Počet dní se sněhovou pokrývkou	40 – 50
Počet zamračených dní	120 – 140
Počet jasných dní	40 – 50

9.1.3 VĚTRNÉ PODMÍNKY

Rychlosti větru byly zjištěny na internetových stránkách ústavu fyziky atmosféry AV ČR v. v. i. z mapy extrémních nárazů větru ve výšce 10 m nad povrchem. Pro zjištění rychlosti větru se na internetové stránce ústavu zobrazí interaktivní mapa a zvolí se zájmové území. Pro výpočet výšky vlny dle normy uvažuje ve výpočtu s nejhorším scénářem. Jde o vítr s opakováním N = 100 let pro všechny směry. Podle (Obr.87) je to rychlost 37,67 m/s.

Zem. šířka: 49°17'52" 771"N
Zem. délka: 17°26'59" 122"E

směr / doba opakování	5 let	10 let	20 let	50 let	100 let
11.25° - 56.25°	19.86	21.33	22.79	24.72	26.19
56.25° - 101.25°	19.30	21.11	22.92	25.32	27.13
101.25° - 146.25°	17.96	19.68	21.40	23.68	25.40
146.25° - 191.25°	20.14	21.80	23.47	25.67	27.33
191.25° - 236.25°	21.37	23.63	25.90	28.90	31.17
236.25° - 281.25°	23.62	25.94	28.26	31.33	33.64
281.25° - 326.25°	25.16	27.45	29.73	32.75	35.04
326.25° - 11.25°	21.97	23.92	25.88	28.47	30.43
všechny směry	27.83	30.18	32.46	35.43	37.67



Obr. 87 Tabulka a směrová růžice N letých větrů na nádrži Hulín [17]

9.2 VÝPOČET VÝŠKY VLN NA NÁDRŽI HULÍN PRO ZÁKLADNÍ SMĚRY

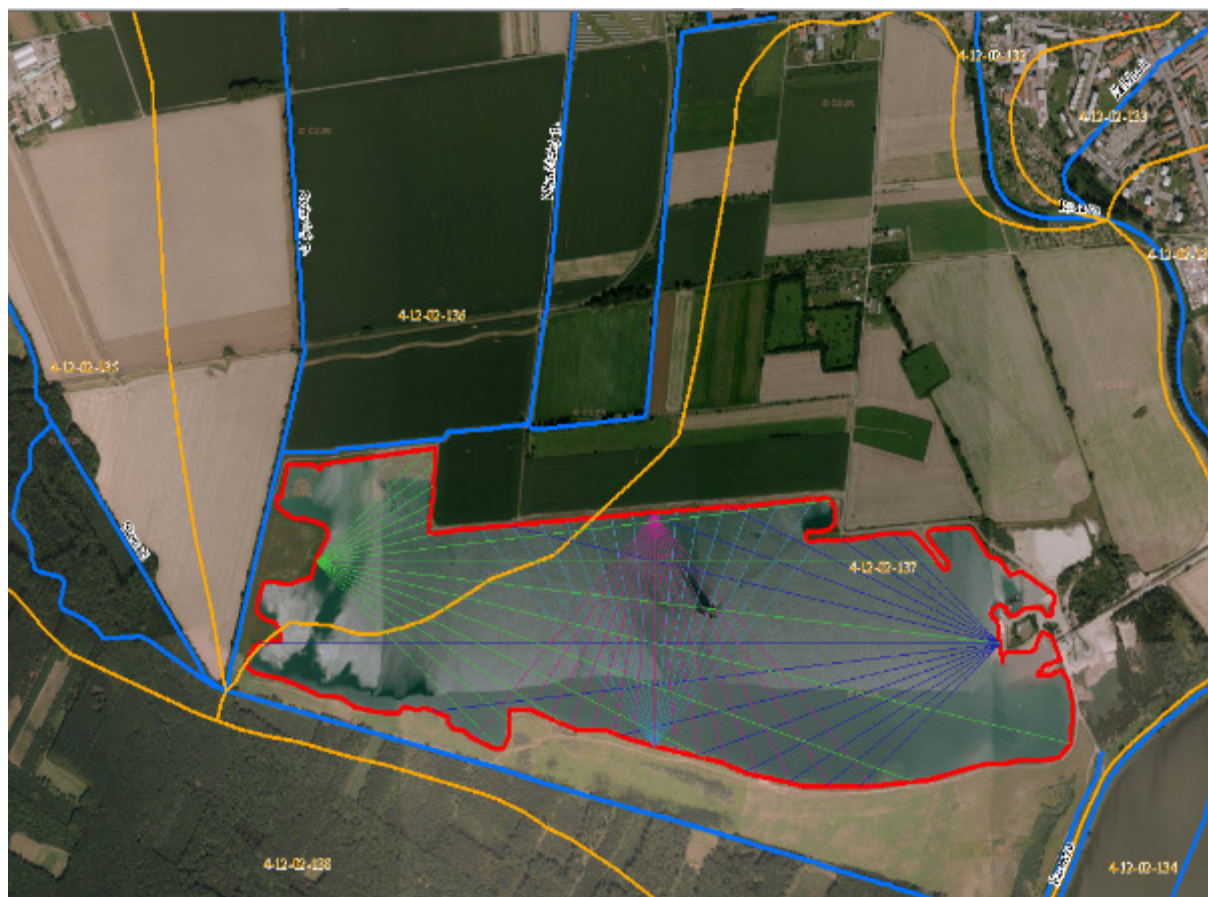
V první části byl proveden výpočet výšky oscilačních vln, dle ČSN 750255 *Výpočet účinku vln na stavby na vodních nádržích a zdržích*, pro 4 základní směry – středy břehů nádrže (Obr. 88).

9.2.1 EFEKTIVNÍ DÉLKA ROZBĚHU VLNY

Efektivní délka rozběhu větru L_{ef} se stanoví z 15 - ti délek rozběhu vln, takzvaných radiál, vedených středem osy hráze, tak že střední délka je totožná s hlavním směrem větru a další radiály se kreslí po obou jejích stranách v intervalu po 6° až k protějším břehům (Obr. 88). [14]

$$L_{ef} = \frac{\sum_{i=1}^{15} L_i \cos^2 \varphi_i}{\sum_{i=1}^{15} \cos \varphi_i} [m] \quad (9.1)$$

kde L_i je délka i -té radiály [m] a φ_i úhel, který svírá i -tá radiála s radiálou v hlavním směru $[\circ]$.



Obr. 88 Efektivní délka rozběhu vlny v základních směrech na nádrži Hulín

9.2.2 STANONOVENÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ VLN

Pro výpočet se použilo rychlosti větru po dobu trvání 1 až 2 hodin s pravděpodobností překročení 1 % $w_{10z} = 37,67$ m/s, vycházející z větrných podmínek na nádrži s opakováním N100.

Vztah mezi rychlostí větru nad hladinou a hladinou vody dochází k zaclonění okolím terénem. Pro přepočet se použije vzorec:

$$w_{10v} = k * w_{10z} [m/s] \quad (9.2)$$

kde k je součinitel určený z tab. 2 normy ČSN 75 0255.

Nejdříve se vypočte výška nahnání hladiny větrem ΔH :

$$\Delta H = k_w * \frac{w_{10v}^2 * L}{g * H} * \cos \delta [m] \quad (9.3)$$

kde k_w je součinitel závislý na rychlosti větru [-], w_{10v} rychlost větru [m/s] dle rovnice (9.2), L délka rozběhu vlny [m], g gravitační konstanta [N.m²/kg²], H hloubka vody při hladině v klidu [m] a $\cos \delta$ úhel mezi podélnou osou nádrže a směrem větru [°].

Charakteristická výška vlny h_c se určí podle grafu na obr. 3 normy ČSN 75 0255, tak že se ukazateli $\frac{gL_{ef}}{w_{10v}^2}$ odečte na příslušné obálce $\frac{gH}{w_{10v}^2}$ grafu veličina $\frac{gh_c}{w_{10v}^2}$, ze které se následně vypočte hodnota $h_{0c} \cong h_c$.

Perioda vlny T_{0c} , příslušná k charakteristické výšce vlny h_{0c} se určí podle grafu na obr. 4 normy ČSN 75 0255, tak že se ukazateli $\frac{gL_{ef}}{w_{10v}^2}$ odečte na příslušné obálce grafu veličina $\frac{gT}{2\pi w_{10v}}$, ze které se následně vypočte hodnota $T_{0c} (\cong T)$.

K vyvolání ustáleného vlnění při dané rychlosti větru je potřeba minimální doba trvání větru $t [min]$, který závisí na periodě vlny $T [s]$. Výpočet *periody* t podle rovnice:

$$t_{min} = 0,027 * \frac{L_{ef}}{T} [min] \quad (9.4)$$

kde L_{ef} je efektivní délka rozběhu vlny [m] a T perioda vlny [s].

Délka vlny λ_c se vypočte dle rovnice:

$$\lambda_c = \frac{g \cdot T_{0c}^2}{2 \cdot \pi} [m] \quad (9.5)$$

kde g gravitační konstanta [$N \cdot m^2 / kg^2$] a T_{0c} perioda vlny [s].

Postupová rychlost se vypočte dle rovnice:

$$c_c = \frac{\lambda_c}{T_c} [m/s] \quad (9.6)$$

kde λ_c je délka vlny vypočtená dle rce. (9.5) a T_c perioda vlny. [5]

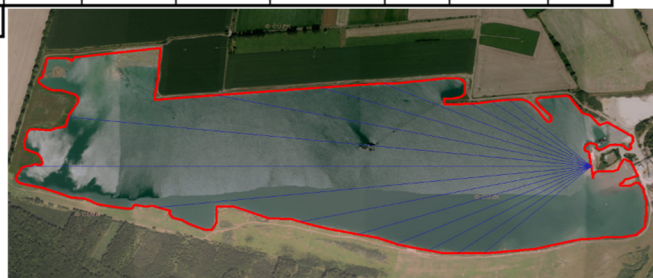
Celý postup výpočtu je shrnut do tabulek pro jednotlivé směry v *tab. 1*, *tab. 2*, *tab. 3*, *tab. 4* a pro zvolený svah v *tab. 5*

9.2.3 SMĚR 1

Tab. 2 Výpočet výšky vlny ve směru 1

Radiála	L_i	ϕ_i	úhel rad	$L_i \cdot \cos^2 \phi$	$\cos \phi$	L_{ef}	gL_{ef}/w_{10v}^2	gH/w_{10v}^2	$gT/2\pi w_{10v}$	T	ghc/w_{10v}^2	hc
1	399.716	42	0.73	220.75	0.74	958.06	5.52	0.09	0.1380	3.65	0.0075	1.30
2	443.619	36	0.63	290.35	0.81							
3	506.19	30	0.52	379.64	0.87							
4	819.422	24	0.42	683.86	0.91							
5	1024.34	18	0.31	926.52	0.95							
6	1379.52	12	0.21	1319.89	0.98							
7	1894.88	6	0.10	1874.18	0.99							
8	2040.52	0	0.00	2040.52	1.00							
9	1570	6	0.10	1552.85	0.99							
10	1071.92	12	0.21	1025.58	0.98							
11	884.693	18	0.31	800.21	0.95							
12	769.098	24	0.42	641.86	0.91							
13	676.952	30	0.52	507.71	0.87							
14	597.014	36	0.63	390.75	0.81							
15	524.436	42	0.73	289.63	0.74							
				12944.31	13.51							

ΔH	0.0218 [m]
kw	2.32E-06 [-]
w_{10z}	37.67 [m/s]
k	1.095806 [-]
w_{10v}	41.279 [m/s]
g	9.81 [$N \cdot m^2 / kg^2$]
H	15 [m]
L	1159.84 [m]
L_c	20.78 [m]
cc	5.70 [m/s]



Obr. 89 Rozběh vln pro směr 1 na nádrži Hulín

9.2.4 SMĚR 2

Tab. 3 Výpočet výšky vlny ve směru 2

Radiála	L_i	Φ_i	úhel rad	$L_i \cdot \cos^2 \Phi$	$\cos \Phi$	L_{ef}	gL_{ef}/w_{10v}^2	gH/w_{10v}^2	$gT/2\pi w_{10v}$	T	ghc/w_{10v}^2	hc
1	674.272	42	0.73	372.38	0.74	536.55	3.71	0.09	0.1190	2.87	0.0065	1.10
2	747.48	36	0.63	489.23	0.81							
3	688.74	30	0.52	516.55	0.87							
4	643.00	24	0.42	536.62	0.91							
5	614.18	18	0.31	555.53	0.95							
6	591.95	12	0.21	566.36	0.98							
7	577.37	6	0.10	571.06	0.99							
8	569.56	0	0.00	569.56	1.00							
9	568.16	6	0.10	561.95	0.99							
10	572.88	12	0.21	548.11	0.98							
11	584.09	18	0.31	528.32	0.95							
12	602.49	24	0.42	502.82	0.91							
13	629.21	30	0.52	471.90	0.87							
14	666.03	36	0.63	435.92	0.81							
15	715.77	42	0.73	395.29	0.74							
				7249.25	13.51							

ΔH 0.0440 [m]
 kw 2.32E-06 [-]
 w_{10z} 37.67 [m/s]
 k 1.08 [-]
 w_{10v} 40.6836 [m/s]
 g 9.81 [N.m²/kg²]
 H 15 [m]
 L 2411.77 [m]
 Lc 12.87052 [m]
 cc 4.48 [m/s]



Obr. 90 Rozběh vln pro směr 2 na nádrži Hulín

9.2.5 SMĚR 3

Tab. 4 Výpočet výšky vlny ve směru 3

Radiála	L_i	ϕ_i	úhel rad	$L_i \cdot \cos^2 \phi$	$\cos \phi$	L_{ef}	gL_{ef}/w_{10V}^2	gH/w_{10V}^2	$gT/2\pi w_{10V}$	T	ghc/w_{10V}^2	hc
1	741.641	42	0.73	409.58	0.74	576.52	3.42	0.089	0.1250	3.26	0.0060	1.01
2	593.032	36	0.63	388.14	0.81							
3	576.53	30	0.52	432.40	0.87							
4	569.516	24	0.42	475.30	0.91							
5	556.057	18	0.31	502.96	0.95							
6	547.805	12	0.21	524.12	0.98							
7	556.423	6	0.10	550.34	0.99							
8	569.29	0	0.00	569.29	1.00							
9	585.27	6	0.10	578.87	0.99							
10	608.53	12	0.21	582.23	0.98							
11	644.55	18	0.31	583.00	0.95							
12	700.43	24	0.42	584.56	0.91							
13	762.61	30	0.52	571.96	0.87							
14	827.48	36	0.63	541.59	0.81							
15	896.34	42	0.73	495.02	0.74							
				7789.36	13.51							

ΔH 0.0351 [m]
 kw 2.32E-06 [-]
 w_{10z} 37.67 [m/s]
 k 1.08 [-]
 w_{10v} 40.6836 [m/s]
 L 1921.73 [N.m²/kg²]
 g 9.81 [m]
 H 15 [m]
 Lc 16.56417 [m]
 cc 5.09 [m/s]



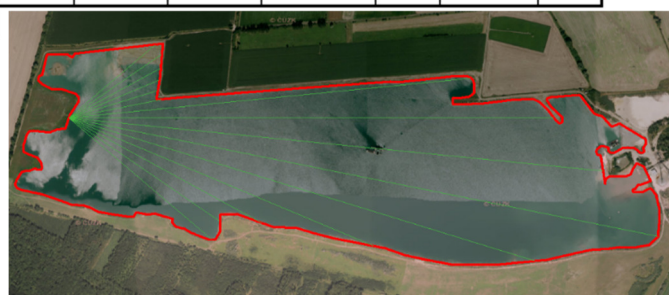
Obr. 91 Rozběh vln pro směr 3 na nádrži Hulín

9.2.6 SMĚR 4

Tab. 5 Výpočet výšky vlny ve směru 4

Radiála	L_i	ϕ_i	úhel rad	$L_i \cdot \cos^2 \phi$	$\cos \phi$	L_{ef}	gL_{ef}/w_{10V}^2	gH/w_{10V}^2	$gT/2\pi w_{10V}$	T	ghc/w_{10V}^2	hc
1	678.803	42	0.73	374.88	0.74	935.92	5.41	0.087	0.1400	3.69	0.0075	1.30
2	657.831	36	0.63	430.56	0.81							
3	784.901	30	0.52	588.68	0.87							
4	1175.43	24	0.42	980.97	0.91							
5	1728.43	18	0.31	1563.38	0.95							
6	2124.42	12	0.21	2032.59	0.98							
7	1894.65	6	0.10	1873.95	0.99							
8	1710.69	0	0.00	1710.69	1.00							
9	1425.33	6	0.10	1409.76	0.99							
10	333.958	12	0.21	319.52	0.98							
11	328.939	18	0.31	297.53	0.95							
12	349.382	24	0.42	291.58	0.91							
13	373.322	30	0.52	279.99	0.87							
14	404.732	36	0.63	264.90	0.81							
15	409.506	42	0.73	226.16	0.74							
				12645.13	13.51							

ΔH	0.0159 [m]
kw	2.32E-06 [-]
w_{10z}	37.67 [m/s]
k	1.093592 [-]
w_{10v}	41.19561 [m/s]
L	851.524 [N.m ² /kg ²]
g	9.81 [m]
H	15 [m]
Lc	21.30438 [m]
cc	5.77 [m/s]



Obr. 92 Rozběh vln pro směr 4 na nádrži Hulín

Z výpočtu výšky vlny pro jednotlivé směry je očekávatelné naměření vln v maximální výšce od 1 m do 1,3 m.

9.3 MÍSTO MĚŘENÍ

Zájmové území k měření bylo vybráno, jako jedno z nejvíce namáhaných bočních břehů oscilačními větrovními vlnami (Obr. 93). V současné době probíhá v ložisku těžba a provoz remorkérů na nádrži. Měření tedy bude ovlivněno i vlnami vyvolanými projíždějícími loděmi. Lodě projíždí nádrží cca 32x denně. Místo pro měření bylo zvoleno po dohodě tak, aby nebylo významně ovlivněno provozem lodí na nádrži, a zároveň nebylo v kolizi s plánovaným využitím těžebního ložiska.



Obr. 93 Přehledná fotka zájmového svahu [14]



Obr. 94 Fotka zájmového území z pevniny

9.3.1 VÝPOČET VÝŠKY VLN NA NÁDRŽI HULÍN PRO ZVOLENÝ SVAH

Tab. 6 Výpočet výšky vlny pro zvolený svah

Radiála	L_i	Φ_i	úhel rad	$L_i \cdot \cos^2 \Phi$	$\cos \Phi$	L_{ef}	gL_{ef}/w_{10v}^2	gH/w_{10v}^2	$gT/2\pi w_{10v}$	T	ghc/w_{10v}^2	hc
1	650	42	0.73	358.97	0.74	630.05	3.73	0.09	0.1250	3.26	0.0061	1.03
2	446	36	0.63	291.91	0.81							
3	453	30	0.52	339.75	0.87							
4	463	24	0.42	386.40	0.91							
5	480	18	0.31	434.16	0.95							
6	506	12	0.21	484.13	0.98							
7	842	6	0.10	832.80	0.99							
8	721	0	0.00	721.00	1.00							
9	640	6	0.10	633.01	0.99							
10	582	12	0.21	556.84	0.98							
11	537	18	0.31	485.72	0.95							
12	1011	24	0.42	843.75	0.91							
13	1184	30	0.52	888.00	0.87							
14	1369	36	0.63	896.02	0.81							
15	652	42	0.73	360.08	0.74							
				8512.54	13.51							

ΔH	0.0212 [m]
kw	2.32E-06 [-]
w_{10z}	37.67 [m/s]
k	1.08 [-]
w_{10v}	40.6836 [m/s]
g	9.81 [N.m ² /kg ²]
H	15 [m]
L	1159.84 [m]
Lc	16.56417 [m]
cc	5.09 [m/s]



Obr. 95 Rozběh vln pro zvolený svah

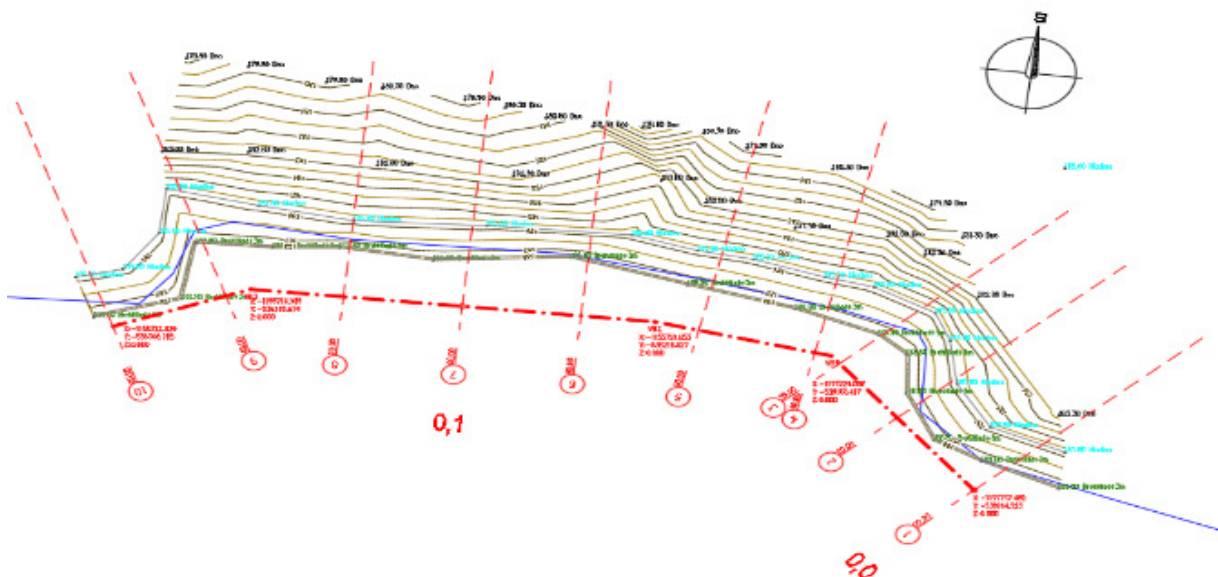
Z výpočtu výšky vlny pro zvolené místo měření je očekávatelné naměření vln maximální výšky do 1 m. To je optimální výška pro dlouhodobé měření. Tímto výpočtem můžeme určit výšku plošiny konstrukce pro dlouhodobé měření a to 1,5 m nad hladinou při známé délce čidel 3 m a požadované hloubce v nádrži, v místě umístění čidel, alespoň 3 m.

9.3.2 ZAMĚŘENÍ SVAHU NÁDRŽE

Zaměření svahu nádrže, kde je zamýšleno osazení konstrukce proběhlo dne 23.11.2018. Měření dna nádrže probíhalo z remorkéru za pomoci GPS stanice a echolotu. Data byla zaznamenávána do počítače. Výsledný soubor dat zaměření jsou prostorové souřadnice x, y a z zapsané do souboru .x/sx. Tyto souřadnice byly importovány do programu Civil 3D a byl zpracován do 3D modelu terénu. Následně byla vytvořena situace terénu, provedli se řezy terénem a bylo zvoleno nejvhodnější místo pro osazení konstrukce. Za nejoptimálnější bylo zvoleno místo mezi profily 4 a 5 (Obr. č.97).



Obr. 96 Zapojení echolotu na předremorkéru

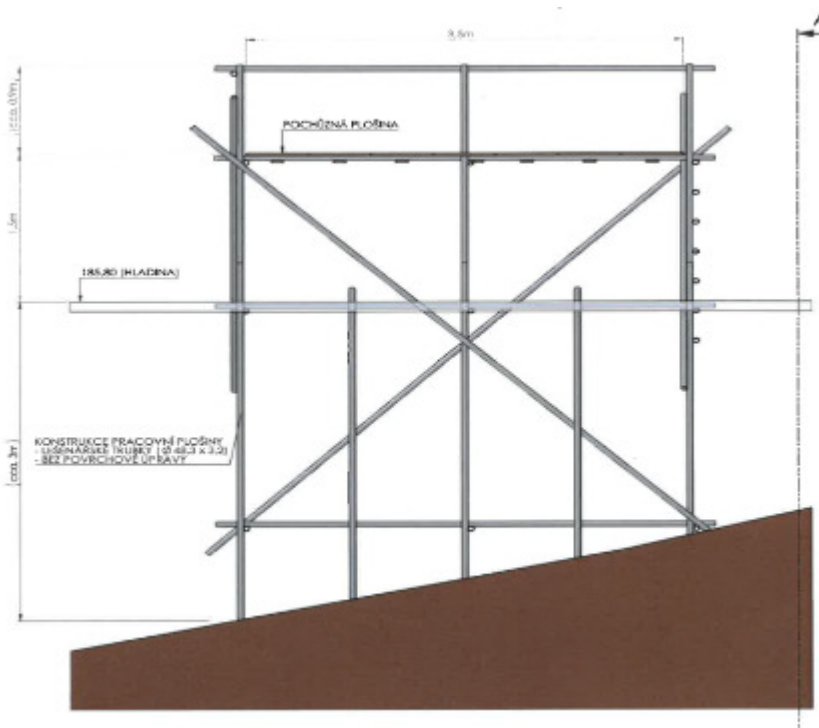


Obr. 97 Situace terénu břehu

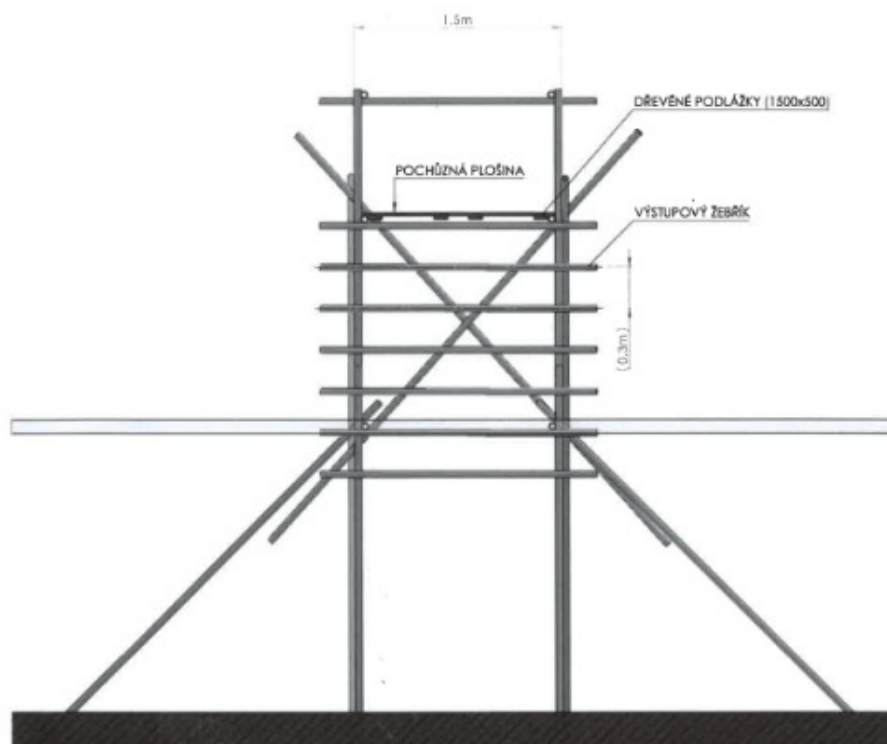
9.1 FINÁLNÍ NÁVRH KONSTRUKCE PRO DLOUHODOBÉ MĚŘENÍ V TĚŽEBNÍ LAGUNĚ PÍSKOVNY V HULÍNĚ

Finální podoba konstrukce, která bude osazena na nádrži v Hulíně je navržena jako pracovní plošina z lešeňových trubek zakotvená do dna nádrže. Konstrukce je navržena panem Pernicou z firmy PS Profi. Tato firma se zabývá potápěčskými pracemi a pro náš účel zajišťuje návrh a montáž konstrukce pracovní plošiny. Tvar a složení konstrukce je patrný z obr. 98 a obr. 99.

Cena konstrukce plošiny je odhadována na 30 000 Kč a montážní práce jsou odhadovány na cca 130 000 Kč. Plošina bude přístupná pouze z hladiny vody, což omezuje přístup nepovolaných osob.



Obr. 98 Boční pohled na konstrukci pracovní plošiny



Obr. 99 Čelní pohled na konstrukci pracovní plošiny

10 ZÁVĚR

V současné době se výpočtem účinku větrových oscilačních vln na vodní stavby a přirozené břehy nádrží zabývá norma ČSN 75 0255 „*Výpočet účinků vln na stavby na vodních nádržích a zdržích*“, která byla vydána v roce 1987. Norma vychází z informací a stavu poznání z období před 30 lety. V této normě jsou uvedeny grafy, které byly sestaveny z experimentálních měření v laboratoři a měření u mořských pobřeží opírající se o předpoklad vzniku jednoduchých sinusových vln s platností lineární teorie šíření vln. V dnešní době se rozšířily možnosti měření a zpracování dat, možnosti simulace účinků vln na konstrukce a stavby a jejich výpočet. Rovněž doporučení pro návrh opatření pro ochranu staveb a břehů nádrží se s postupným vývojem nových materiálů a výrobků rozšiřují, což vede k potřebě doplňovat informace o účincích zatížení vlnami.

Tato práce se zabývá především stanovením parametrů vln, a tedy hlavně spektra vln a spektrálních charakteristik vlnového pole, o které se v současnosti návrh konstrukcí a ochranných opatření opírají. Jedná se o z přesnění stanovení výšky vln a jejich prezentování ve formě histogramu četnosti výskytu výšky jednotlivých vln. Energie vln je prezentována ve formě spektrální hustoty.

V první části práce je vysvětlena základní problematika výpočtu a zpracování naměřených dat sledovaných u vln. Je zde uvedena teorie zobrazení, výpočtu a záznamu dat a řešerše dostupných měřicích systémů na trhu s popisem principu měření.

V druhé části práce je základně popsán systém měřicího zařízení vyvíjený v rámci projektu TA03030182 na měření vln na nádržích s výškou měřených vln do 1 m, fungující na principu měření odporu pomocí pásek. Přístroj na měření byl odzkoušen pomocí pilotní testovací konstrukce měřicího systému, a to v laboratoři, na nádrži a opětovně v laboratoři. Systém je sestaven ze tří odporových pásek rozmístěných v určité vzdálenosti do tvaru rovnostranného trojúhelníku, čímž se snažíme docílit takového zachycení signálu, aby bylo možné sestavit prostorové spektrum měřených vln.

Následující část práce popisuje zpracování dat z posledního testovacího měření. Pro automatizované zpracování naměřených dat v prostředí MATLAB byl vytvořen M-soubor. Tento skript je podrobně popsán v 7. kapitole a je zde vysvětleno, co znamená každý příkaz ve skriptu, aby mohl být výpočet budoucím uživatelem případně modifikován. Skript je plně automatizován, při použití souboru nástrojů WAFO v prostředí MATLAB. Výstup z programu WAFO je zapsán do tabulkového souboru do matice s jednotlivými parametry měřených vln, a to počet vln, celkový počet vln na 3 odporových páskách, charakteristická výška vlny, výška vlny s pravděpodobností překročení 1 %, výška vlny s pravděpodobností překročení 13 %, vrcholová perioda, střední perioda vlny, střední perioda procházející nulou, perioda energie, hlavní směr šíření vln (poloha maxima energie) a disperze směru šíření vln. Dále jsou vytvořeny grafy, a to jeden graf směrového spektra, tři grafy spektrální hustoty na jednotlivých odporových páskách s_1 , s_2 a s_3 , průběh vln v určitém časovém úseku s označením maxim a minim vln na jednotlivých odporových páskách, rozložení směrového spektra energie vln po kruhové orbitě a histogram hustoty rozdělení výšky vlny a její distribuční funkce a porovnání s Rayleighovým rozdělením.

V další části jsou sepsány požadavky pro návrh konstrukce pro osazení měřicího zařízení na nádržích a byl proveden návrh s konkrétní aplikací konstrukce pro zvolenou nádrž, na které je v plánu budoucí dlouhodobé měření po dobu 4 let. Byla domluvena spolupráce na uzavřené nádrži štěrkopískovny Hulín. Na této nádrži byl zvolen a zaměřen břeh pro budoucí měření. Byla provedena základní rešerše o území a odhad parametrů vln na hladině těžební laguny pískovny v Hulíně dle normy ČSN 75 0255. Provedené výpočty prokázaly použitelnost zvolené koncepce pro zadané použití. V poslední části je popsána finální podoba konstrukce pro osazení měřicího systému v nádrži těžební laguny pískovny v Hulíně. Konstrukce je řešena jako plošina z lešeňových prvků zakotvená do dna nádrže, přístupná pouze z hladiny.

Pro dlouhodobé měření vln na nádrži Hulín, bylo testováním a zpracováním prokázáno, že je reálné měření vln malé výšky pomocí odporových pásek, z něž lze stanovit spektra vln vznikající na uzavřených vodních nádržích. V příloze je přiložen M-soubor pro automatické zpracování dat do výstupního protokolu, a je domluvené místo a konstrukce pro měřicí systém. Vše je tedy připraveno k realizaci konstrukce a zahájení dlouhodobého měření. Výsledky měření na nádrži umožní individualizovat ochranná opatření proti účinkům větrových oscilačních vln na nádrži Hulín. Přesné (individuální) stanovení výšky vln umožní přesnější stanovení účinků zatížení svahů vlnami na konkrétní nádrži a s tím spojené možnosti přerozdělení objemů v nádrži a přesnější stanovení mezní bezpečné hladiny.

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

11.1 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Značka	Popis
ASCII	jde o kódovou tabulku, která definuje znaky anglické abecedy a jiné znaky používané v informatice
AMR	Anizotropická Magnetická Resistance
FAST	Fakulta Stavební
LVV	Laboratoř Vodohospodářského Výzkumu
MATALAB	(Matrix Laboratory) MATicová LABoratoř
VUT	Vysoké Učení Technické v Brně
WAFO	(Wave Analysis for Fatigue and Oceanography) Vlnová Analýza pro Únavu a Oceánografii
<i>chtext</i>	buňka vektorů řetězců popisující prvky <i>ch</i>
<i>fakt</i>	vektor faktorů celých čísel, řetězec nebo řádek řetězců
<i>dat2dspec</i>	odhad spektra směrových vln z časových souborů
<i>dat2spec</i>	odhad jednostranné spektrální hustoty z dat
<i>dat2steep</i>	extrakce hodnot výšek a strmosti vln z naměřených da
<i>icdf</i>	stanovení inverzní kumulativní distribuční funkce pro určitou distribuci

11.2 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Značka	Veličina	Rozměr
A_n	Fourierův koeficient	[-]
a_i	Fourierův koeficient	[-]
A_c	amplituda výkyvu	[m]
A_t	minimální amplituda	[m]
b_i	Fourierův koeficient	[-]
bfs (j)	použití j-té časové řady v konečném odhadu frekvenční spektra	[-]
c_c	postupová rychlost vlny	[m/s]
c	vrchol vlny	[-]
c	konstanta	[-]
$\cos \theta_i$	posloupnost fází	[-]
c_w	vrcholová délka vlny	[m]
d	střednice vlny	[-]
def (j)	identifikační parametr pro j-tou časovou řadu	[-]
d_w	úroveň dolní vlny	[m]

D	odhad funkce rozložení jako funkce θ a w	[-]
f	základní frekvence	[Hz]
F_{cof}	Fourierovy koeficienty funkce šíření $D(W, \theta)$	[-]
F_{Mdir}	Průměrný směr vln	[°]
F_{Pdir}	Hlavní směr vln	[°]
F_{Spr}	Směrové rozložení M_{dir}	[-]
F_{skew}	Kruhové zkreslení M_{dir}	[-]
F_{MSpr}	Střední úhel rozložení směru	[°]
F_{S1}	Distribuční disperzní parametr S	[-]
ω	kruhová frekvence	[Hz]
g	gravitační konstanta	[m/s ²]
g	transformace za předpokladu, že x je vzorek transformovaný Gaussův proces.	[-]
h_i	naměřené hloubky vody	[m]
h_{i0}	standardizované hloubky	[m]
h	hloubka vody	[m]
h	ponořená hloubka senzoru	[m]
H	výška hladiny vody	[m]
h_c	charakteristická výška vlny	[m]
H_d	výška vlny, jak je definována pro vlny s přechodem dolů	[m]
H_u	výška vlny, jak je definována pro vlny s přechodem	[m]
H_{m0}	charakteristická výška vlny	[m]
H_{1p}	výška překročení vlny s pravděpodobností 1 %	[m]
H_{13p}	výška překročení vlny s pravděpodobností 13 %	[m]
ch	vektor spektrálních charakteristik	[-]
I	elektrický proud	[A]
ImLM	iterativní metoda maximální pravděpodobnosti	[-]
K	konstanta zahrnující průměr drátu, elektrický izolátor a permitivita dielektrik	[F/m]
L	maximální zpoždění délky okna	[-]
L	délka rozběhu větru	[m]
L	délka ponoření tyčí	[m]
L	naměřený elektrický odpor	[Ω]
L_{ef}	efektivní délka rozběhu větru	[m]
L_i	délka i-té radiály rozběhu vlny	[m]
M	magnetické pole	[-]
m	střední hodnoty, průměr všech hodnot	[...]
m_n	spektrální moment	[...]

mw	délka vlny minima	[m]
Mw	délka vlny lokálního maxima	[m]
N	počet vln	[ks]
N _{Pi}	očekávaná četnost v jednotlivých částech	[ks]
N _t	počet úhlů	[ks]
N _{fft}	proměnná pro stejné rozlišení frekvence při porovnání zaměřených signálů s nepatrně odlišnými délkami	[-]
p	míra spolehlivosti	[%]
P _i	pravděpodobnost že veličina nabyde hodnoty z i-té části	[-]
pos	matice pozic jednotlivých snímacích zařízení s konstantami	[-]
r	poloměr kružnice	[m]
R	matice odpovídající kovarianci danou T	[-]
R	odpor	[Ω]
R _i	nezávislý náhodný faktor s distribucí Rayleigh	[-]
S	Strmost vlny	[-]
S	2D pole odhadovaného směrového spektra	[-]
S	Struktura směrové spektrální hustoty s úhlovou frekvencí	[-]
S(ω)	frekvenční spektrum	[m ² .s/rad]
S(ω _i)	spektrum výkonu x(t) zapsané jako dvousloupcová matice	[m ² .s/rad]
sin θ _i	Posloupnost fází	[-]
S	Výkonné spektrum	[m ² .s/rad]
t	čas	[s]
t	úžlabí vlny	[-]
T	perioda	[s]
T _c	perioda vlny	[s]
T _{mM}	perioda z minima do maxima	[s]
T _{Mm}	perioda z maxima do minima	[s]
T _p	vrcholová perioda	[s]
T _{p1}	vrcholová perioda (robustní odhad)	[s]
T _{pMdir}	Střední směr vlny na spektrálním vrcholu	[-]
T _{pSpr}	Směrové rozložení T _{pMdir}	[-]
T _{pSkew}	Zkreslení T _{pMdir}	[-]
W _{dir}	Hlavní směr vln	[°]
T _{MM}	Vrcholová perioda	[s]
T _{mm}	Úžlabní perioda	[s]
t _{min}	minimální trvání větru	[min]
T _{m01}	střední perioda vlny	[s]
T _{m02}	střední perioda vlny procházející nulou	[s]

$T_{M,10}$	perioda energie	[s]
tw	úžlabní délka vlny	[m]
u	střednice vlny	[-]
U_s	stabilizované napětí	[V]
uw	úroveň horní vlny	[m]
v	rychlost	[m/s]
v_s	rychlost postupu vody z povodí	[m/s]
w_{10v}	rychlost větru ve výšce 10 m nad hladinou vody v klidu	[m/s]
w_{10z}	rychlost větru ve výšce 10 m nad zemí	[m/s]
X^2	Pearsonův chí-kvadrát	[-]
x	matice dat sloupců se vzorkovanými časy	[-]
$x(j)$	souřadnice polohy j-tého senzoru	[-]
$x(t)$	spojitý signál se základní frekvencí	[-]
$X(t)$	náhodná funkce normálně distribuována	[-]
$y(j)$	souřadnice polohy j-tého senzoru	[-]
$z(j)$	souřadnice polohy j-tého senzoru	[-]
ΔR	změna odporu	[Ω]
ΔU	změna napětí	[V]
Π	Ludolfovo číslo	[-]
$\Delta\omega$	vzorkovací interval	[rad/s]
ω	kruhová frekvence	[rad/s]
ω_i	i-tá kruhová frekvence	[rad/s]
θ_i	sekvence	[-]
σ	standardní odchylka	[...]
σ	vodivost vody	[1/($\Omega \cdot m$)]
σ^2	odchylka měřící variabilitu kolem průměru	[...]
$\hat{\sigma}^2$	odhad maximální nestranné pravděpodobnosti	[...]
δ	úhel mezi podélnou osou nádrže a směrem větru	[°]
φ_n	počáteční fáze	[rad]
φ_i	úhel, který svírá i-tá radiála s hlavním směrem větru	[°]
λ_{0c}	délka vlny	[m]

12 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] GUARAGLIA, Dardo Oscar, Jorge Lorenzo POUSA, Alessandro PEZZOLI a Robert G. WATTS. *Introduction to Modern Instrumentation for Hydraulics and Enviromental Sciences* [online]. 1. Deutsche: Deutsche Nationalbibliothek The Deutsche Nationalbibliothek list, 2014. ISBN 978-3-11040172-1. Dostupné z: <http://dnb.dnb.de>.
- [2] HAIKL, Petr. *Ověření funkce bezkontaktního snímače hladiny paliva v palivové nádrži*. [online]. České Budějovice, 2013. Dostupné z: <https://theses.cz/id/8bgmll/?lang=en>. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta, Katedra aplikované fyziky a techniky. Vedoucí práce doc. PaedDr. Petr Adámek, Ph.D.
- [3] - *a Matlab Toolbox for Analysis of Random Waves and Loads: Turtorial for WAFO version 2017* [online]. Lund University: Fanculty of Engineering, Center for Mathematical Sciences, Mathematical Statistics, 2017. Dostupné z: http://www.maths.lth.se/matstat/wafo/Wafo_tutorial_2017.pdf.
- [4] *MATLAB: Programming Fundamentals* [online]. March 2017. The MathWorks, Inc. 3 Apple Hill Drive Natick, MA 01760-2098: MATLAB and Simulink are registered trademarks of The Math Works, 2017. Dostupné z: http://it.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/matlab_prog.pdf
- [5] ČSN 75 0255 *Výpočet účinku vln na stavby na vodních nádržích a zdržích* Československý normalizační institut, únor 1987
- [6] BOOR, B.- KUNŠTÁCKÝ, J.- PATOČKA, C. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. Praha: SNTL, 1968.
- [7] ŠOFER, Michal. *Digitální zpracování signálů – Fourierova transformace, FFT Frekvenční analýza* [přednáška]. Ostrava: Strojní fakulta VŠB TU. Dostupné z: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/EXPME_3.pdf
- [8] Holčík J, Komenda M (eds.) a kol. *Matematická biologie: e-learningová učebnice* [online]. 1. vydání. Masarykova univerzita [2015]. Dostupné z: <http://portal.matematickabiologie.cz>. ISBN 978-80-210-8095-9.
- [9] LAZAR, Josef. *Signál v čase a jeho spektrum* [online]. Brno, 2015, s. 15. Dostupné z: <https://docplayer.cz/6513844-Signal-v-case-a-jeho-spektrum.html>
- [10] COOPER, George R. a Clare D. MCGILLEM. *Propabilistic Methods of Signal and System Analysis*. 3rd edition. Oxford: Oxford university press, 1999. ISBN 0-19569189-X.
- [11] ŘÍHA, Jaromír. *Modelové řešení rozsahu ochranného pásma 2. stupně jímacího území u Hulína*. Brno, 2001.
- [12] QUITT, E., *Mapa klimatických oblastí ČSSR, 1:500 000*. Kartografické nakladatelství Praha pro Geografický ústav ČSAV Brno, 1970.
- [13] www.en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_distribution
- [14] www.maps.google.cz

- [15] www.mapy.geology.cz
- [16] www.mapy.cz
- [17] www.vitr.ufa.cas.cz
- [18] www.leseni.cz
- [19] www.milonetech.com
- [20] www.google.com/imghp
- [21] USACE 1984, *Shore protection manual*. 4rd. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1984.
- [22] PELIKÁN, Petr. *Ochrana konstrukcí vodních staveb a přirozených břehů před účinky oscilačních větrových vln, dílčí zpráva III/2018: Vývoj systému sběru a přenosu dat oscilačních větrových vln*. Brno, prosinec 2018.

13 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Orientační platnost teorií šíření vln dle USACE 1984. [21]	4
Obr. 2 Rovnoměrné oscilační vlny [7]	6
Obr. 3 Definice parametrů vln [3].....	7
Obr. 4 Definice amplitudy a výšky vlny [3]	8
Obr. 5 Definice period vln [3].....	8
Obr. 6 Výřez z tabulky Fourierova rozvoje pro různé funkce [9].....	9
Obr. 7 Převod mezi kmitočtovou a časovou doménou [9]	9
Obr. 8 Grafická znázornění harmonické časové řady a veličin, které určují její průběh. a) Harmonická časová řada. b) Rotující fázor v komplexní rovině. c) První půlperioda amplitudového frekvenčního spektra harmonické časové řady. [8]	10
Obr. 9 Spektrální hustota výkonu [8]	11
Obr. 10 Graf naměřených dat ze 3 odporových pásek.....	12
Obr. 11 Směrové spektrum energie.....	13
Obr. 12 Vrcholová spektrální hustota (Peak)	14
Obr. 13 Rozložení směru energie po kruhové orbitě.....	14
Obr. 14 Průběh vln v časovém intervalu z minima do maxima.....	14
Obr. 15 Histogram četnosti výskytu vln.....	15
Obr. 16 Plovoucí bóje [1]	17
Obr. 17 Těžká bóje [20]	18
Obr. 18 GPS bóje [20].....	19
Obr. 19 Akustický senzor na měření vln [1]	20
Obr. 20 Dopplerův proudový profilor [20]	20
Obr. 21 Radarový snímač vln [20].....	21
Obr. 22 Princip měření optickým zařízením [1]	22
Obr. 23 Kapacitní snímač [3]	23
Obr. 24 Odporový snímač na měření vln [1].....	24
Obr. 25 Schéma funkce Permalloy [2]	25
Obr. 26 Wheatstonův můstek [2]	25
Obr. 27 Centrální jednotka Raspberry Pi2 [22].....	26
Obr. 28 Řídící jednotka sběru dat kolísání vodní hladiny Arduino UNO Rev3 [22].....	27
Obr. 29 Odporové čidlo [20].....	28
Obr. 30 Detail části zapojení odporového čidla [22].....	28
Obr. 31 Anemometr WindETH [22]	28
Obr. 32 USB webkamera s HD rozlišením [20]	29

Obr. 33 Modem USB Vodafone [20].....	29
Obr. 34 Solární panel BlueSolar 80Wp [22].....	29
Obr. 35 Baterie Banner 80Ah [20]	29
Obr. 36 Schéma umístění měřicího systému vůči vodní hladině v nádrži [22]	30
Obr. 37 Uložení řídících jednotek měřicího systému v plastovém boxu (stupeň krytí IP 68) [22] ...	30
Obr. 38 Blokové schéma měřicího systému sběru a přenosu dat [22]	31
Obr. 39 Blokové schéma pilotního měřicího systému sběru a přenosu dat [22]	32
Obr. 40 Zapojení snímačů pro sběr dat do centrální jednotky.....	32
Obr. 41 Konstrukce měřicího zařízení.....	32
Obr. 42 Sběr dat z měření v laboratoři	32
Obr. 43 Generování vln v laboratoři.....	33
Obr. 44 Test měřicího zařízení v laboratoři.....	33
Obr. 45 Místo měření na přehradě v Brně [15]	34
Obr. 46 Generování vln pomocí plastové lopaty na sníh	34
Obr. 47 Měřicí zařízení	34
Obr. 48 Záznam vln generovaný průjezdem lodí	35
Obr. 49 Místo měření – laboratorní nádrž v budově B.....	35
Obr. 50 Záznam dat z měření do textového souboru	36
Obr. 51 Generování vln a osazení přístroje.....	36
Obr. 52 Měřicí systém zařízení.....	36
Obr. 53 Načtení dat a nastavení výstupu v M-souboru	38
Obr. 54 Převedení, standardizování času a hloubek v M-souboru	39
Obr. 55 Odhad spektra směrových vln v M-souboru.....	39
Obr. 56 Odhad jednostranné spektrální hustoty v M-souboru.....	40
Obr. 57 Vyhodnocení spektrální směrové charakteristiky v M-souboru.....	41
Obr. 58 Vytažení výšek a strmosti vln v M-souboru	41
Obr. 59 Výpočet charakteristik vln v M-souboru	42
Obr. 60 Histogram rozdělení výšek vln.....	42
Obr. 61 Výpočet sumy čtverců a odhad rozdělení histogramu	42
Obr. 62 Odhad parametru rozdělení Rayleigh	43
Obr. 63 Výpočet spektrální hustoty.....	43
Obr. 64 Test dobré shody	43
Obr. 65 Stanovení inverzní kumulativní funkce.....	44
Obr. 66 Vykreslení a úprava grafu	44
Obr. 67 Distribuční rozdělení funkce	44

Obr. 68 Distribuční rozdělení funkce	45
Obr. 69 Vyvolání a zapsání výsledků charakteristik vln v M-souboru.....	45
Obr. 70 Směrové spektrum energie vln.....	46
Obr. 71 Spektrální hustota z pásy s1	46
Obr. 72 Průběh vln na konci měření z pásy s1– maxima a minima.....	47
Obr. 73 Průběh vln na konci měření z pásy s1– maxima a minima.....	47
Obr. 74 Průběh vln na konci měření z pásy s1– maxima a minima.....	47
Obr. 75 Anemometr [20].....	49
Obr. 76 Solární panel [20].....	49
Obr. 77 Potápěčské práce [20].....	49
Obr. 78 Půdorys a pohled na konstrukci trojboký jehlan	50
Obr. 79 Půdorys a pohled na konstrukci s podstavou z HEB profilů.....	50
Obr. 80 Půdorys a pohled na konstrukci s podstavou z betonové desky.....	51
Obr. 81 Konstrukce z lešeňových prvků	52
Obr. 82 Rám lešení 70/200 [18]	52
Obr. 83 Pracovní podlaha ocelová 3 m [18]	52
Obr. 84 Úhlopříčné stužidlo délky 3 m [18].....	52
Obr. 85 Umístění nádrže [16].....	53
Obr. 86 Geomorfologická mapa [15]	54
Obr. 87 Tabulka a směrová růžice N letých větrů na nádrži Hulín [17].....	55
Obr. 88 Efektivní délka rozběhu vlny v základních směrech na nádrži Hulín.....	56
Obr. 89 Rozběh vln pro směr 1 na nádrži Hulín	58
Obr. 90 Rozběh vln pro směr 2 na nádrži Hulín	59
Obr. 91 Rozběh vln pro směr 3 na nádrži Hulín	59
Obr. 92 Rozběh vln pro směr 4 na nádrži Hulín	60
Obr. 93 Přehledná fotka zájmového svahu [14].....	60
Obr. 94 Fotka zájmového území z pevniny	61
Obr. 95 Rozběh vln pro zvolený svah.....	61
Obr. 96 Zapojení echolotu na příď remorkéru	62
Obr. 97 Situace terénu břehu	62
Obr. 98 Boční pohled na konstrukci pracovní plošiny.....	63
Obr. 99 Čelní pohled na konstrukci pracovní plošiny.....	63

14 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Tabulka klimatických podmínek oblasti T2 [12].....	55
Tab. 2 Výpočet výšky vlny ve směru 1	58
Tab. 3 Výpočet výšky vlny ve směru 2.....	59
Tab. 4 Výpočet výšky vlny ve směru 3.....	59
Tab. 5 Výpočet výšky vlny ve směru 4.....	60
Tab. 6 Výpočet výšky vlny pro zvolený svah.....	61

15 SEZNAM PŘÍLOH

1) CD disk – Obsah:

- Data zaznamenaná z pilotního měření v souboru s příponou .txt
- Výsledky z pilotního měření v souboru s příponou .xlsx
- M – soubor pro zpracování dat z odporového snímače – TACR_vlny_uvod.m
- histmira.m – skript pro vykreslení histogramu výšek vln – vykreslení obrázku grafu
- distmira.m – distribuční rozdělení funkce dle Rayleigh – vykreslení obrázku grafu
- Diplomová práce v elektronické podobě